

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

УДК 577.35:597.551.2:591.3.043:537-962

ЗМІНА ФЕРМЕНТАТИВНОЇ АКТИВНОСТІ Na^+ , K^+ -АТФАЗИ ЗАРОДКІВ В'ЮНА ЗА ВПЛИВУ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**М.М. Яремчук, С.М. Мандзинець, М.В. Дика, М.В. Бура, Д.І. Санагурський***Львівський національний університет імені Івана Франка**вул. Грушевського, 4, Львів 79005, Україна*

e-mail: m.yaremchuk@i.ua

Надійшла до редакції 1 листопада 2013 року

Прийнята до друку 13 грудня 2013 року

Досліджено вплив мікрохвильового випромінювання різної тривалості на Na^+ , K^+ -АТФазну активність зародків в'юна (*Misgurnus fossilis* L.) протягом раннього ембріогенезу. Показано, що випромінювання на частоті мобільного зв'язку (900 МГц) проявляє інгібуючу дію на активність АТФ - гідролази мембран зародків. Між активністю АТФази та тривалістю впливу не встановлено дозозалежного ефекту. На стадії 10 поділу бластомерів активність ферменту за різної тривалості опромінення знаходилась на одному рівні. Ймовірно, що механізм впливу мікрохвильового випромінювання на АТФ-гідролазну активність натрій-калієвої помпи реалізується через зміни ліпідного оточення під дією даного чинника, оскільки зміни в активності мембранних ферментів можуть бути наслідком активації процесів пероксидного окиснення ліпідів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікрохвильове випромінювання, Na^+ , K^+ -АТФаза, пероксидне окиснення ліпідів, плазматична мембрана, поділ бластомерів, зародки в'юна.

MICROWAVE RADIATION INFLUENCE ON THE CHANGE OF Na^+ , K^+ -ATPase ACTIVITY OF LOACH EMBRYOS**M.M. Yaremchuk, S.M. Mandzynets, M.V. Dyka, M.V. Bura, D.I. Sanagursky***Ivan Franko National University of Lviv, 4, Hryshchivskyi St., Lviv 79005, Ukraine*

The effect of microwave radiation with long-term exposure on the activity of Na^+ , K^+ -ATPase of loach embryos (*Misgurnus fossilis* L.) during early embryogenesis has been researched. It has been shown that mobile phone radiation (900 MHz in particular) demonstrated the inhibitory effect on the Na^+ , K^+ -ATPase activity of embryonic membrane. The dose-dependent effect between ATPase activity and duration of exposure has not been established. Varying the duration of exposure at the stage of 10th division of blastomeres, the enzyme activity was on the same level, which means it had similar values. Probably, the mechanism of microwave radiation effect on sodium-potassium pump is realized through the changes in lipid environment under the influence of current factor as far as changes in the activity of cell membrane enzymes might be resulted by the intensification of lipid peroxidation processes.

KEY WORDS: microwave radiation, Na^+ , K^+ -ATPase, lipid peroxidation, plasma membrane, division of blastomeres, loach embryos.

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ Na^+ , K^+ -АТФАЗЫ ЗАРОДЫШЕЙ ВЬЮНА**М.М. Яремчук, С.М. Мандзинець, М.В. Дика, М.В. Бура, Д.І. Санагурський***Львовский национальный университет им. Ивана Франко, ул. Грушевского, 4, Львов 79005, Украина*

Исследовано влияние микроволнового излучения различной длительности на Na^+ , K^+ -АТФазную активность зародышей вьюна (*Misgurnus fossilis* L.) в течение раннего эмбриогенеза. Установлено, что излучение на частоте мобильной связи (900 МГц) проявляет ингибирующее действие на активность АТФ - гидролазы мембран зародышей. Между активностью АТФази и продолжительностью экспозиции не обнаружено дозозависимого эффекта. На стадии 10 деления бластомеров активность фермента при различной продолжительности облучения находилась на одном уровне. Вероятно, что механизм влияния микроволнового излучения на АТФ-гидролазную активность натрий-калиевой помпы реализуется вследствие изменения липидного окружения под действием данного фактора. Изменения в активности мембранных ферментов могут быть следствием повышения процессов перекисного окисления липидов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроволновое излучение, Na^+ , K^+ -АТФаза, перекисное окисление липидов, плазматическая мембрана, деление бластомеров, зародыши вьюна.

На сучасному етапі розвитку науки та техніки все актуальнішою стає проблема електромагнітного забруднення навколишнього середовища. Більшість побутових приладів генерує електромагнітне поле (ЕМП), рівень якого перевищує гранично допустимі норми. Такий фізичний фактор впливає на живі об'єкти на різних рівнях організації. Дослідження впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на ембріональний розвиток допоможе розширити уявлення про його дію.

Відомо, що ЕМП впливає на репродуктивну функцію чоловіків та жінок, збільшення патологій у новонароджених дітей [1, 2]. Оскільки, чутливість ембріона до фізико-хімічних чинників є значно вищою, ніж чутливість дорослого організму [3]. Відомо, що мікрохвильове випромінювання на частотах мобільного зв'язку (постійне опромінення інкубаційних курячих яєць протягом усього періоду інкубації) призводить до зростання ембріональної смертності [4, 5].

Зазначене вище обумовлює теоретичне і практичне значення та актуальність дослідження впливу мікрохвильового випромінювання на зародкові клітини в'юна в період раннього ембріогенезу. Вивчення активності Na^+ , K^+ -АТФази зародкових клітин прісноводної риби в'юна, як системи енергозалежного транспортування іонів Na^+ , K^+ у регуляції функціональної відповіді клітини, дасть можливість поглибленого розуміння механізмів біологічної дії мікрохвильового випромінювання на частотах мобільного зв'язку. Тому, мета роботи полягала у дослідженні впливу мікрохвильового випромінювання на активність Na^+ , K^+ -АТФази упродовж раннього ембріогенезу.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження проводили на зародках в'юна *Misgurnus fossilis* L. через 60, 150, 210, 270 та 330 хв після запліднення яйцеклітин під час стадій, які відповідають першому поділу зиготи (2 бластомери), четвертому (16 бл.), шостому (64 бл.), восьмому (256 бл.) і десятому (1024 бл.). Овуляцію стимулювали внутрішньом'язовим введенням самкам хоріонічного гонадотропіну (500 од). Ікру одержували через 36 год після стимуляції та запліднювали у чашках Петрі суспензією спермій за Нейфахом [6]. Сім'яники отримували після декапітації та розтину черевної порожнини самців. Через 5-10 хв після запліднення зиготи відмивали та інкубували у фізіологічному розчині Гольтфретера при температурі 20-22°C. Стадії розвитку зародків контролювали візуально біокулярним мікроскопом МБС-9.

Отримані зиготи піддавали опроміненню на частотах мобільного зв'язку 900 МГц. Опромінювали одноразово, відразу після запліднення, протягом 1, 5, 10 та 20 хв, з відбором зародків на досліджуваних стадіях. Як джерело мікрохвильового випромінювання використовували мобільний телефон, що перебував у режимі розмови та містився над чашками Петрі на відстані 3 см. Частота випромінювання становила 900 МГц. Рівень питомого коефіцієнту поглинання електромагнітної енергії (Specific Absorption Rate - SAR), згідно з паспортом телефону, становить 1,1 Вт/кг.

Мікросомну фракцію мембран одержували методом диференційного центрифугування гомогенату зародків у градієнті густини сахарози [7]. Реакцію проводили шляхом додавання аліквоти суспензії мембранного препарату мікросомної фракції (10 мкл) в стандартне середовище інкубації, яке містило (ммоль/л): NaCl – 30,0; KCl – 125,0; MgCl_2 – 3,0; трис- Cl – 50,0 (pH=7,4; t= 21°C). АТФ-гідролазну реакцію ініціювали додаванням 3 ммоль/л АТФ та інкубували 15 хв при t= 21°C, а зупиняли додаванням 10% ТХО. Na^+ , K^+ -АТФазну активність визначали за різницею між вмістом неорганічного фосфату (P_i) у стандартному безкальцієвому середовищі, при додаванні та за відсутності оубаїну (1 ммоль/л).

Питому активність Na^+ , K^+ -АТФазної системи досліджуваних клітин оцінювали за різницею між кількістю P_i , що утворився в середовищі інкубації за наявності та відсутності фрагментів мембран, з урахуванням поправки на вміст ендogenous P_i в мембранному препараті й виражали в мкмоль P_i у перерахунку за год на 1 мг білка. Кількість продукту реакції P_i визначали за модифікованим методом Фіске-Суббароу [8], а вміст білка в суспензії мембранного препарату – за методом Лоурі [9].

Статистичне опрацювання отриманих даних здійснювали з використанням програмного пакета для персональних комп'ютерів *Microsoft Excel*, достовірність змін встановлювали за критерієм Ст'юдента [10].

РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

На мікросомальних фракціях мембран зародків в'юна встановлено закономірні зміни активності Na^+ , K^+ -АТФази [11, 12]. Ця активність є низькою або відсутня у незаплідненій яйцеклітині, а після запліднення різко збільшується та залишається на тому ж рівні до стадії ранньої бластули. Через 5-6 годин після запліднення відбувається різке зниження рівня активності помпи. Крім того показано, що протягом кожного клітинного циклу дроблення бластомерів активність Na^+ , K^+ -АТФази періодично змінюється: вона максимальна у інтерфазі, а під час мітозу спадає [13, 14]. У ооцитів шпорцевої жаби показана потенціалозалежність Na^+ , K^+ -АТФази [15], але передбачають і інші фактори регуляції активності помпи, пов'язані зі змінами функціонального стану плазматичної мембрани зародків, зокрема, з співвідношенням ліпід/протеїн [16, 17], яке протягом клітинного циклу дроблення має тенденцію змінюватись.

Отримані нами результати свідчать, що електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону знижує активність Na^+ , K^+ -АТФази зародків у період синхронних поділів. Встановлено, що вплив мікрохвильового випромінювання на зародкові клітини, одразу після запліднення, протягом 1, 5, 10 та 20 хв зумовлює достовірне зниження активності ферменту вже на стадії 2 бластомерів (рис. 1, а) і становить, відповідно $4,58 \pm 0,2$; $5,42 \pm 0,2$; $4,16 \pm 0,1$ та $2,84 \pm 0,1$ мкмоль P_i /год на 1 мг білка ($n = 10$, $p \geq 0,999$).

На стадії 16 бластомерів (рис. 1, б) при експозиції опромінювання 1 хв, активність ферменту становила $55,7 \pm 0,2\%$ контрольної, однак, порівняно з попередньою стадією вона знижувалась на $39,4 \pm 0,2\%$ відносно контролю. Опромінення тривалістю 5, 10 та 20 хв, призводило до достовірного зниження активності АТФази відносно контрольної на $52,1 \pm 0,2$; $64,6 \pm 0,1$ та $48,5 \pm 0,1\%$, відповідно.

На наступній досліджуваній стадії (через 3,5 год після опромінення) (рис. 1, в) відмічено найбільше зниження активності АТФази за тривалості випромінювання 10 хв, яка становила $6,94 \pm 0,1$ мкмоль P_i / год на 1 мг білка ($45 \pm 0,1\%$), відносно контролю. За більш тривалої експозиції джерела випромінювання (20 хв), активність ферменту відповідала значенню $9,06 \pm 0,1$ мкмоль P_i / год на 1 мг білка.

На наступних етапах розвитку (8 та 10 поділи бластомерів) (рис. 1) спостерігали зниження активності, порівняно з попередніми досліджуваними стадіями та контролем. На стадії 8-го поділу (рис. 1, г) за впливу мікрохвильового випромінювання різної тривалості, активність досліджуваної АТФази достовірно знизилась, порівняно з контролем та становила $5,93 \pm 0,2$; $6,96 \pm 0,2$; $4,51 \pm 0,1$ та $3,63 \pm 0,1$ мкмоль P_i /год на 1 мг білка, відповідно. На останній з досліджуваних стадій (6 год розвитку) (рис. 1, д) не спостерігається відмінностей у величині активності ензиму ($4,84 - 5,38$ мкмоль P_i / год на 1 мг білка), зокрема, після опромінення тривалістю 1, 5, 10 та 20 хв.

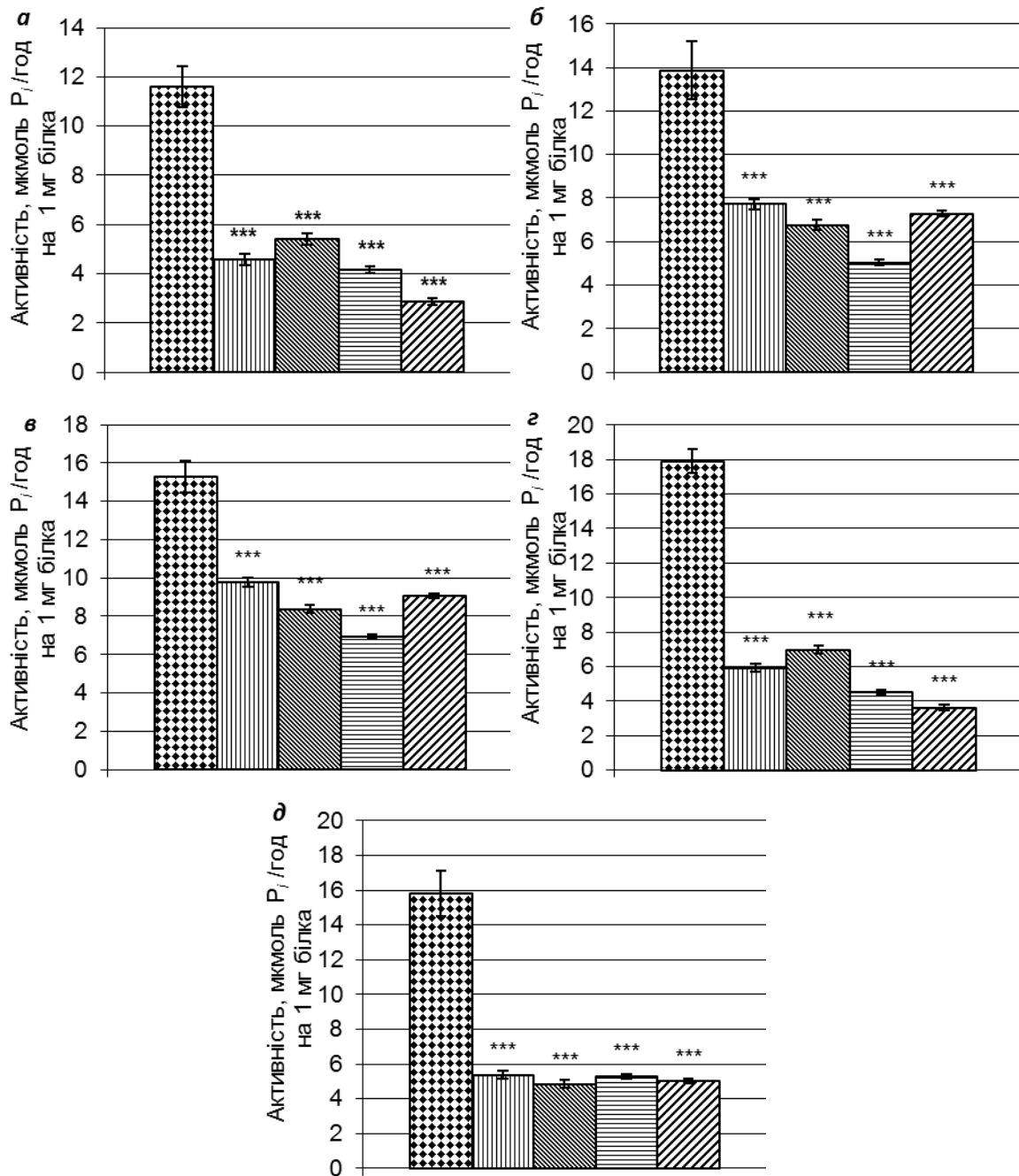


Рис. 1. Активність Na^+ , K^+ -АТФази на різних стадіях розвитку зародків за дії мікрохвильового випромінювання: - контроль, - 1 хв, - 5 хв, - 10 хв, - 20 хв; а – 2 бластомери, б – 16 бластомерів, в – 64 бластомери, г – 8 поділ, д – 10 поділ.

* — $p \geq 0,95$; ** — $p \geq 0,99$; *** — $p \geq 0,999$ — вірогідні зміни порівняно з контролем

Отже, при одноразовому опроміненні після запліднення активність ферменту зростає до стадії 64 бластомерів (3,5 год після запліднення) незалежно від тривалості опромінення, а далі спостерігається зниження та встановлення величини досліджуваного показника на одному рівні незалежно від часу експозиції. Ці зміни активності можуть бути пов'язані з будовою зародка, який на стадії 64 бластомерів стає двошаровим.

Відомо, що пероксидне окиснення ліпідів (ПОЛ) призводить до зниження активності Na^+ , K^+ -АТФази [18], яка значно та незворотно знижується за наявності гідроксил-радикалу OH^\bullet та кисневих радикалів $\text{O}_2^{\bullet-}/\text{HO}_2$ чи синглетного кисню $^1\text{O}_2$ [19-22]. У попередніх дослідженнях нами показано зростання кількості малонового діальдегіду (МДА) у мембранах зародків в'юна за дії мікрохвильового випромінювання тривалістю 1, 5, 10 та 20 хв, що свідчить про інтенсифікацію процесів окиснення ліпідів, яка може опосередковано пригнічувати активність мембранних ферментів, зокрема Na^+ , K^+ -АТФази.

Проведений кореляційний аналіз підтвердив, що між процесами пероксидного окиснення ліпідів (вміст МДА) [23] та активністю Na^+ , K^+ -АТФази існує середньої тісноти негативний зв'язок. На стадії 64 бластомерів спостерігається сильний негативний кореляційний зв'язок між досліджуваними показниками. Проте, на стадії 10 поділу - зв'язок слабкий, оскільки на цьому етапі розвитку відбувається десинхронізація поділу зародкових клітин, що може призвести до автономізації метаболічних процесів у диференційованих клітинах [24]. Невиключена дія ЕМВ на інші мішені, що призводить до пригнічення активності цієї іонтранспортної системи в умовах одноразового опромінення зародків.

Табл. 1.
Кореляційний зв'язок між процесами пероксидного окиснення ліпідів та активністю Na^+ , K^+ -АТФази

Стадії розвитку	2 бластомери	16 бластомерів	64 бластомери	8 поділ	10 поділ
Коефіцієнт кореляції (достовірність кореляції)	-0,62 ($p \geq 0,95$)	-0,48 ($p \geq 0,95$)	-0,89 ($p \geq 0,95$)	-0,52 ($p \geq 0,95$)	-0,10 ($p \geq 0,95$)

Ймовірно, що механізм впливу мікрохвильового випромінювання на АТФ-гідролазну активність натрій-калієвої помпи реалізується через зміни ліпідного оточення під дією даного чинника, оскільки зміни в активності мембранних ферментів можуть бути наслідком підвищення процесів ПОЛ.

Отримані результати узгоджуються з даними інших дослідників, які показали, що мікрохвильове випромінювання впливає на активність Na^+ , K^+ -АТФази в еритроцитах людини [25, 26] та зміни у функціонуванні інших ферментів [27-30].

ВИСНОВКИ

Отже, мікрохвильове випромінювання призводить до вираженого пригнічення активності Na^+ , K^+ -АТФази зародків в'юна на різних стадіях розвитку. Між активністю АТФази та тривалістю експозиції не встановлено дозозалежного ефекту. На стадії 10 поділу бластомерів активність ферменту за різної тривалості опромінення знаходилась на одному рівні. Зниження активності ферменту транспортування іонів Na^+ та K^+ , за дії мікрохвильового випромінювання, може реалізуватись двома способами. По-перше, Na^+ , K^+ -АТФаза може бути мішенню, яка взаємодіє з електромагнітним випромінюванням, наслідком чого є конформаційні зміни у білковій молекулі, що може викликати зниження активності ферменту. З іншого боку, не виключений механізм опосередкованого впливу на активність цього ферменту через інтенсифікацію процесів окиснення ліпідів зародкових мембран під дією даного випромінювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Панков В. А. Оценка профессионального риска у работников гидроэлектростанций, подвергшихся воздействию электромагнитных полей промышленной частоты / В. А. Панков, М. В. Кулешова // Бюл. Вост.-Сиб. НЦ. – 2005. – №8. – С. 148–150. /Pankov V. A. Ocenka professional'nogo riska u rabotnikov gidrojelektrostantsij, podvergshijsja vozdejstvuju jelektromagnitnyh polej promyshlennoj chastoty / V. A. Pankov, M. V. Kuleshova // Bjul. Vost.-Sib. NC. – 2005. – №8. – S. 148–150./
2. Розенберг Г. С. Воздействие электромагнитного загрязнения на здоровье населения (на примере города Тольятти) / Г. С. Розенберг, Н. Г. Лифиренко, Н. В. Костина // Экология урбанизированных территорий. – 2007. – №4. – С. 21–24. /Rozenberg G. S. Vozdejstvie jelektromagnitnogo zagrjaznenija na zdorov'e naselenija (na primere goroda Tol'jatti) / G. S. Rozenberg, N. G. Lifirenko, N. V. Kostina // Jekologija urbanizirovannyh territorij. – 2007. – №4. – S. 21–24./
3. Хорсева Н. И. Экологическое значение естественных электромагнитных полей в период внутриутробного развития человека: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. биол. наук: спец. 03.00.02 / Хорсева Н. И. – Ин-т биохим. физики РАН. – М., 2004. – 20 с. /Horseva N. I. Jekologicheskoe znachenie estestvennyh jelektromagnitnyh polej v period vnutriutrobnogo razvitija cheloveka: avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. biol. nauk: spec. 03.00.02 / Horseva N. I. – In-t biohim. fiziki RAN. – M., 2004. – 20 s./
4. Григорьев Ю. Т. Влияние электромагнитного поля сотового телефона на куриные эмбрионы / Ю. Т. Григорьев // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2003. – Т. 43. – № 5. – С. 541–543. /Grigor'ev Ju. T. Vlijanie jelektromagnitnogo polja sotovogo telefona na kurinye jembriony / Ju. T. Grigor'ev // Radiac. biologija. Radiojekologija. – 2003. – T. 43. – № 5. – S. 541–543./
5. Effects of exposing chicken eggs to a cell phone in “call” position over the entire incubation period / F. Batellier, I. Couty, D. Picard [et al.] // Theriogenology. – 2008. – V. 69. – № 5. – P. 737–745.
6. Нейфах А. А. Проблемы регуляции в молекулярной биологии развития / А. А. Нейфах, М. Я. Тимофеева. – М.: Наука. – 1978. – 336 с. /Nejfah A. A. Problemy reguljacii v molekularnoj biologii razvitija / A. A. Nejfah, M. Ja. Timofeeva. – M.: Nauka. – 1978. – 336 s./
7. Луцик М. Д. Очистка и частичная характеристика плазматических мембран клеток зародышей вьюна / М. Д. Луцик, С. И. Кусень, А. В. Лукьяненко // Онтогенез. – 1986. – № 17 (3). – С. 314–321. /Lucik M.D. Ochistka i chastichnaja harakteristika plazmaticeskikh membran kletok zarodyšej v'juna / M. D. Lucik, S. I. Kusen', A. V. Luk'janenko // Ontogenez. – 1986. – № 17 (3). – S. 314–321./
8. Прохорова М. И. Методы биохимических исследований (липидный и энергетический обмен) / под ред. М. И. Прохоровой. — Л.: Изд-во Ленинград. ун-та. – 1982. — 272 с. /Prohorova M. I. Metody biohimicheskikh issledovanij (lipidnyj i jenergeticheskij obmen) / pod red. M. I. Prohorovoj. — L.: Izd-vo Leningrad. un-ta. – 1982. — 272 s./
9. Protein measurement with the Folin phenol reagent / O. H. Lowry, N. G. Rosebrough, A. L. Farr, R. C. Randall // J. Biol. Chem. – 1951. – V. 193. – P. 265–275.
10. Деркач М. П. Курс вариационной статистики / М. П. Деркач, Р. Я. Гумецкий, М. Е. Чабан. Київ: Вища школа. – 1977. – 208 с. /Derkach M. P. Kurs variacijnoji statistiki / M. P. Derkach, R. Ja. Gumeckij, M. E. Chaban. Київ: Vishha shkola. – 1977. – 208 s./
11. Бериташвили Д. Р. Исследование электрохимических свойств клеточной мембраны в раннем эмбриогенезе вьюна: автореф. дис. канд. Биол. Наук. М. – 1971. – 25 с. /Beritashvili D. R. Issledovanie jelektrohimicheskikh svojstv kletочноj membrany v rannem jembrionogeneze v'juna: avtoref. dis. kand. Biol. Nauk. M. – 1971. – 25 s./
12. Характеристики электрофизиологических параметров мембран эмбриональных клеток вьюна при ингибировании Na^+/K^+ -АТФазы / Е. А. Гойда, И. Р. Медына, Д. И. Санагурский, Н. С. Стельмах // Онтогенез. – 1989. – Т. 20. – №2. – С. 164–170. /Harakteristiki jelektrofiziologicheskikh parametrov membran jembrional'nyh kletok v'juna pri ingibirovanii Na^+/K^+ -ATPazy / E. A. Gojda, I. R. Medyna, D. I. Sanagurskij, N. S. Stel'mah // Ontogenez. – 1989. – T. 20. – №2. – S. 164–170./
13. Медына И. Р. Механочувствительные калиевые каналы - один из факторов колебаний потенциала покоя в раннем эмбриогенезе вьюна / И. Р. Медына, Е. А. Гойда, П. Д. Брежестовский // Биол. мембраны. – 1988. – Т. 5. – № 9. – С. 960–969. /Medyna I. R. Mehanochuvstvitel'nye kalievye kanaly - odin iz faktorov kolebanij potenciala pokoja v rannem jembrionogeneze v'juna / I. R. Medyna, E. A. Gojda, P. D. Brezhestovskij // Biol. membrany. – 1988. – T. 5. – № 9. – S. 960–969./
14. Бериташвили Д. Р. Изменение отношения К в зародышах вьюна на ранних стадиях развития / Д. Р. Бериташвили, И. Ш. Квавилашвили, К. А. Кафиани // Цитология. – 1969. – Т 9. – № 5. – С. 574–581. /Beritashvili D. R. Izmenenie otnoshenija K v zarodyshah v'juna na rannih stadijah razvitija / D. R. Beritashvili, I. Sh. Kvavilashvili, K. A. Kafiani // Citologija. – 1969. – T 9. – № 5. – S. 574–581./
15. Crystal structure of the calcium pump of sarcoplasmic reticulum at 2.6 Å resolution / C. Toyoshima, M. Nakasako, H. Nomura [et al.] // Nature. – 2000. – V. 405. – P. 647–655.
16. Влияние ионов Са на термолюминесценцию, сопровождающую перекисное окисление липидов / И. О. Мукалов, Е. А. Гойда, С. И. Кусень [и др.] // Биофизика. – 1984. – Т. 29. – № 1. – С. 60–64.

- /Vlijanje ionov Na^+ na termoluminescenciju, soprovozdajushhuju perekisnoe okislenie lipidov / I. O. Mukalov, E. A. Gajda, S. I. Kusen' [i dr.] // Biofizika. – 1984. – T. 29. – № 1. – S. 60–64./
17. Юровицкий Ю.Г. Динамика содержания липидов в эмбриональном и личиночном развитии лосося / Ю. Г. Юровицкий, З. А. Нефедова, В. С. Сидоров // Онтогенез. – 1996. – Т. 27. – №2. – С. 89–94. /Jurovickij Ju.G. Dinamika soderzhaniya lipidov v jembrional'nom i lichinochnom razvitii lososja / Ju. G. Jurovickij, Z. A. Nefedova, V. C. Sidorov // Ontogenez. – 1996. – T. 27. – №2. – S. 89–94./
 18. The effect of lipid peroxidation on the activity of various membrane-bound ATPases in rat kidney / H. Rauchová, J. Ledvinková, M. Kalous, Z. Drahotka // Int. J. Biochem. Cell Biol. — 1995. — V. 27. — P. 251–255.
 19. Lipid peroxidation as the mechanism of modification of the affinity of the Na^+ - K^+ -ATPase active sites for ATP, K^+ , Na^+ , and strophanthidin in vitro / O. Mishra, M. Delivoria-Papadopoulos, G. Cahillane, L. Wagerle // Neurochem. Research. — 1989. — V. 14. — P. 845–851.
 20. Rohn T. Ion Transport ATPases as targets for free radical damage / T. Rohn, T. Hinds, F. Vincenzi // Biochem. Pharmacol. — 1993. — V. 46. — P. 525–534.
 21. Inhibition of cardiac sarcolemma Na^+ - K^+ -ATPase by oxyradical generating systems / Q. Shao, T. Matsubara, S. Bhatt, S. Dhalla // Mol. Cell. Biochem. — 1995. — V. 147. — P. 139–144.
 22. Thomas C. Radical-induced inactivation of kidney Na^+ - K^+ -ATPase: Sensitivity to membrane lipid peroxidation and the protective effect of vitamin E / C. Thomas, D. Reed // Arch. Biochem. Biophys. — 1990. — V. 281. — P. 96–105.
 23. Яремчук М. М. Процеси ліпопероксидації зародків в'юна за умов впливу мікрохвильового випромінювання / М. М. Яремчук, М. В. Дика, Д. І. Санагурський // Вісник Львів. ун-ту. Серія біологічна. Випуск 63. С. 11–17. /Jaremchuk M. M. Procesi lipoperoksidacii zarodkiv v'juna za umov vplivu mikrohvyl'ovogo viprominjuvannja / M. M. Jaremchuk, M. V. Dika, D. I. Sanagurs'kij // Visnik L'viv. un-tu. Serija biologichna. Vipusk 63. S. 11–17./
 24. Санагурський Д. І. Об'єкти біофізики: монографія / Д. І. Санагурський. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. – 522 с. /Sanagurs'kij D. I. Ob'ekti biofiziki: monografija / D. I. Sanagurs'kij. – L'viv: Vidavnicij centr LNU imeni Ivana Franka, 2008. – 522 s./
 25. Allis J. W. Temperature-specific inhibition of human red cell Na^+ - K^+ -ATPase by 2,450-MHz microwave radiation / J. W. Allis, B. L. Sinha-Robinson // Bioelectromagnetics. – 1987. – V. 8. – P. 203–212.
 26. Liu D-S. Activation of Na^+ and K^+ pumping modes of (Na, K)-ATPase by an oscillating electric field / D-S. Liu, R.D. Astumian, T.Y. Tsong // J Biol Chem. – 1990. – V. 265. – P. 7260–7267.
 27. Barteri M. Structural and kinetic effects of mobile phone microwaves on acetylcholinesterase activity / M. Barteri, A. Pala, S. Rotella // J Biophys. Chem. – 2005. – V. 113. – № 3. – P. 245–253.
 28. Byus C.V. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters / C. V. Byus, K. Kartun, S. Pieper, W. R. Adey // Cancer. Res. – 1988. – V. 48. – № 15. – P. 4222–4226.
 29. George D. F. Non-thermal effects in the microwave induced unfolding of proteins observed by chaperone binding / D. F. George, M. M. Bilek, D. R. McKenzie // Bioelectromagnetics. – 2008. – V. 29. – № 4. – P. 324–330.
 30. Intensity-dependent effects of microwave electromagnetic fields on acetylcholinesterase activity and protein conformation in frog skeletal muscles / T. Vukova, A. Atanassov, R. Ivanov, N. Radicheva // Med Sci Monit. – 2005. – V. 11. – P. 50–56.