

УДК 616-08-039.76:316.276  
DOI 10.11603/bmbr.2706-6290.2019.1.10583

В. С. Килівник, В. Л. Смірнова, Н. Я. Панчишин

Вінницький національний медичний університет імені М. І. Пирогова  
Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України

## ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ В МЕДИЧНІЙ РЕАБІЛІТАЦІЇ

### Теорія інформації та її застосування в медичній реабілітації

В. С. Килівник, В. Л. Смірнова, Н. Я. Панчишин

Вінницький національний медичний університет  
імені М. І. Пирогова  
Тернопільський національний медичний університет  
імені І. Я. Горбачевського МОЗ України

**Резюме.** Розвиток системи ефективної медичної реабілітації з урахуванням сьогодишнього рівня громадського здоров'я без сумніву, можна віднести до найважливіших медико-соціальних завдань у сучасній охороні здоров'я. Роль реабілітації у практичній медицині стає все більш значущою. Реабілітацію як процес реалізації комплексу заходів, спрямованих на відновлення соціального і професійного статусу інваліда, до недавнього часу використовували переважно соціальні служби. Проте в останні десятиліття у зв'язку зі зростанням хронічної патології вона стає більш затребуваною й у медичній галузі.

**Мета дослідження** – вивчити та узагальнити результати інформаціологічних досліджень ефективності медичної реабілітації на біохімічному та біофізичному рівнях.

**Матеріали і методи.** Використано інформаціологічний метод та математичний апарат теорії інформації.

**Результати.** Зменшення надлишковості створює для біологічної системи небезпеку легкої інформаційної поломки та зриву. При збільшенні передачі інформації надлишковості відбувається зниження швидкості передачі інформації. Надмірне зростання надлишковості веде до того, що канали перевантажуються надмірною передачею повідомлень, що зменшує кількість нової інформації, яку отримує приймач за одиницю часу по даному каналу зв'язку, тому при дуже великій надлишковості система інформації втрачає свою ефективність, лабільність і стає більш інертною.

**Висновки.** Інформаційні характеристики можна використовувати в якості кількісних критеріїв оцінки ефективності лікування та вибору найоптимальніших методів. Досвід клінічного застосування гальванізації та лікарського електрофорезу свідчить про ефективність використання гальванічного струму щільністю 0,03–0,05 мА/см<sup>2</sup>. Наведені матеріали свідчать про перспективність використання прикладної теорії інформації в медико-біологічних дослідженнях. Теорію інформації можна застосовувати для визначення чутливості біохімічних систем до фізичних факторів, встановлення оптимального діапазону їх дії та оцінки ефективності медичної реабілітації при різних захворюваннях.

©В. С. Килівник та ін., 2019

### Theory of information and its application in medical rehabilitation

V. S. Kylivnyk, V. L. Smirnova, N. Ya. Panchyshyn

M. Pyrohov Vinnytsia National Medical University  
I. Horbachevsky Ternopil National Medical University

e-mail: smirnova@tdmu.edu.ua

**Summary.** The development of an effective medical rehabilitation system, taking into account the current level of public health, can undoubtedly be attributed to the most important medical and social tasks of modern health care. The role of rehabilitation in practical medicine is becoming increasingly important. Until recently, rehabilitation as a process of implementation of a set of measures aimed at restoring the social and professional status of a disabled person has been used mainly by social services. However, in recent decades, with the growth of chronic pathology, it has become more in demand in the medical field.

**The aim of the study** – to learn and summarize the results of information research on the effectiveness of medical rehabilitation at biochemical and biophysical levels.

**Materials and Methods.** The information method and the mathematical apparatus of information theory were used.

**Results.** Reducing redundancy creates a risk of light information breakage and disruption for the biological system. When the redundancy increases, the rate of information transfer decreases. Excessive increase in redundancy causes the channels to be overloaded with excessive messaging, which reduces the amount of new information received by the receiver per unit of time over a given communication channel, so that with very large redundancies the information system loses its efficiency, lability and becomes more inert.

**Conclusions.** Information characteristics can be used as quantitative criteria for evaluating the effectiveness of treatment and selecting the best methods. Experience in the clinical use of galvanization and drug electrophoresis indicates the efficiency of using galvanic current with a density of 0.03–0.05 mA/sm<sup>2</sup>. The given materials testify to the prospect of using applied information theory in biomedical research. Information theory can be applied to determine the sensitivity of biochemical systems to physical factors, to determine the optimal range of their action and to evaluate the effectiveness of medical rehabilitation for various diseases.

**Ключові слова:** інформаціологічні дослідження; медична реабілітація.

**Key words:** informational research; medical rehabilitation.

## ВСТУП

Медична реабілітація, відповідно до реабілітаційного циклу, включає оцінювання з визначенням реабілітаційних цілей, призначенням реабілітації та оцінку індивідуальних результатів [1]. Це вимагає додаткового багатомірного оцінювання функціонування та застосування ІТ-технологій [2]. Результати першого досвіду застосування теорії інформації для аналізу біохімічних систем підтвердили його перспективність [3–5].

П. Ф. Колісник та співавтор розробили та впровадили семирівневу систему медичної реабілітації, ефективність якої підтвердили на практиці [6]. Біохімічний та біофізичний рівні є частиною цієї системи. Інформаціологічні моделі функціональних систем організму та їх роль у прийнятті клінічних рішень наведено в цьому дослідженні [7].

В. С. Улащик використав математичний апарат теорії інформації для характеристики дії фізичних факторів на деякі біохімічні системи організму та використання інформаційних показників для кількісної оцінки ефективності застосовуваних лікувальних факторів та вибору їх оптимальних дозувань.

Для розрахунку інформаційних характеристик використано як власні дані автора, так і результати досліджень інших, які обмежились визначенням двох основних інформаційних показників – ентропії (H біт) та надлишковості (R %) [7].

**Метою дослідження** було вивчити та узагальнити результати інформаційних досліджень ефективності медичної реабілітації на біохімічному та біофізичному рівнях.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Використано інформаціологічний метод та математичний апарат теорії інформації.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Ще у 1955 р. Herdan [8] довів, що для узагальненої характеристики білкового спектра крові можливе використання ентропії. Він розрахував ентропію білкового спектра у здорових людей та знайшов довірчі межі показника:  $H = 1,545 \div 1,805$  біта.

Наведемо спосіб розрахунку ентропії білкового спектра. Skorистаємось для цього даними з таблиці, запозиченої з відомої праці Rapoport [9]. У цю таблицю додано колонку з даними, необхідними для розрахунку ентропії вірогідності P для кож-

ної фракції, тобто це частки, які в сумі складають одиницю (сума вірогідності несумісних наслідків подій дорівнює одиниці).

**Таблиця.** Білкові фракції сироватки крові

Фракція	%	P (частка від загального білка)
альбуміни	63,6±4,00	0,64
α <sub>1</sub> -глобуліни	4,1±0,98	0,04
α <sub>2</sub> -глобуліни	7,4±1,12	0,07
β-глобуліни	9,9±1,92	0,10
γ-глобуліни	15,0±2,52	0,15

Як видно з таблиці, розрахунок P для фракцій спрощується за рахунок переведення відсотків в частки одиниці, тобто вміст фракцій у відсотках зменшується в 100 разів.

Відносною ентропією або коефіцієнтом стиснення інформації називають величину H, яка є відношенням отриманої ентропії до максимальної за умови, що наслідки для усіх елементів однаково вірогідні. Так, наприклад, якщо ми зробили розрахунок ентропії білкового спектра сироватки крові, враховуючи 5 фракцій, то максимальну ентропію повинні розраховувати для 5 елементів із припущенням імовірності для кожного:  $P = \frac{1}{5} = 0,2$ .

Таким чином, для даного випадку максимальна ентропія  $H_{\max} = 5 \times 0,4544 = 2,322$ . Якщо прийняти для здорових людей ентропію білкового спектра сироватки, визначену експериментально,  $H = 1,767$ , то:

$$H = \frac{1,767}{2,322} = 0,75.$$

Отриманий результат свідчить про відносний ступінь завантаження нашої системи інформацією відносно можливого її максимального навантаження. У даному випадку показник 0,75 означає, що це навантаження складає 75 % від максимального, тобто система може нарощувати ентропію в межах 25 %. Даний результат означає, що 25 % інформації використовується у нашій системі для підтримання порядку, організації.

При порівнянні систем або об'єктів із нерівним числом елементів потрібно користуватись не ентропіями, а ще однією інформаційною характеристикою – коефіцієнтом надлишковості або надлишковістю (R).

Для розрахунку надлишковості використовують два підходи. При розрахунку за величинами

ентропій надлишковість обчислюють за формулою:

$$R\% = \left( \frac{H_{\max} - H}{H_{\max}} \right) \times 100 = \left( 1 - \frac{H}{H_{\max}} \right) \times 100.$$

При використанні числа символів у повідомленні розрахунок ведуть за формулою:

$$R\% = \left( \frac{n - n_{\min}}{n} \right) \times 100,$$

де  $n$  – число символів у реальному коді;

$n_{\min}$  – число символів при оптимальному кодуванні.

Зазвичай для розрахунку надлишковості надають перевагу значенням ентропій.

У зазначених формулах показано, яка частка (або %) інформації, яка передається, є надлишковою, порівняно з відповідною оптимальною її передачею, або оптимальним кодом, в якому кожен символ використовують із максимальним навантаженням.

Надлишковість є часткою інформації у повідомленні, яка не вносить в нього нічого нового, але забезпечує надійність передачі, особливо за наявності перешкод (шуму) в їх каналах. В умовах організму такі перешкоди особливо відчутні внаслідок виникнення та розвитку патологічного процесу, або в результаті зниження рівня адаптації організму до умов середовища, які змінились.

Надлишковість інформації гарантує надійність її правильності й точності. Зменшення надлишковості в системі інформації робить її вразливою до дії перешкод, які спотворюють повідомлення. В біологічних системах це призводить до дезорієнтації, неадекватного реагування, деградації саморегулювальних та самоуправляльних механізмів. Таким чином, зменшення надлишковості створює для біологічної системи небезпеку легкої інформаційної поломки та зриву передачі інформації. При збільшенні надлишковості відбувається зменшення швидкості передачі

інформації. Надмірне зростання надлишковості веде до того, що канали перевантажуються надмірною передачею повідомлень, що зменшує кількість нової інформації, яку отримує приймач за одиницю часу з даного каналу зв'язку. Тому при дуже великій надлишковості система інформації втрачає свою ефективність, лабільність і стає більш інертною.

Тому залежно від вимог до швидкості передачі інформації у різних системах зв'язку, які функціонують в організмі, повинні спостерігатись різні рівні надлишковості, які б відповідали цим вимогам.

Хвороба, старіння, впливи надзвичайних та несприятливих зовнішніх факторів створюють шум в інформаційних системах організму, що, у свою чергу, поглиблює порушення регуляторних механізмів організму, призводить до неадекватних та парадоксальних реакцій у відповідь. Інформаційний шум призводить до підвищення невизначеності прийнятої інформації відносно переданої, тобто до зростання ентропії повідомлення, створюючи неоднозначність (ненадійність, еквівокацію) отриманої та відправленої інформації.

Щоб краще зрозуміти вплив шуму на передачу інформації, розглянемо схему системи зв'язку (схема). Система зв'язку, яка здійснює передачу інформації, складається із джерела, передавача, каналу зв'язку, приймача та адресата. Джерело та передавач утворюють вхід у систему, а приймач та адресат – вихід із неї.

Позначаючи вхід через  $x$ , а вихід через  $y$ , можна дати позначення для шести функцій, які характеризують передачу інформації за системою зв'язку:

$H(x)$  – ентропія входу;

$H(y)$  – ентропія виходу;

$H(x, y)$  – сумісна ентропія входу і виходу;

$H(y/x)$  – умовна ентропія – неоднозначність виходу;

$H(x/y)$  – умовна ентропія – неоднозначність входу;

$J(x, y)$  – передана інформація

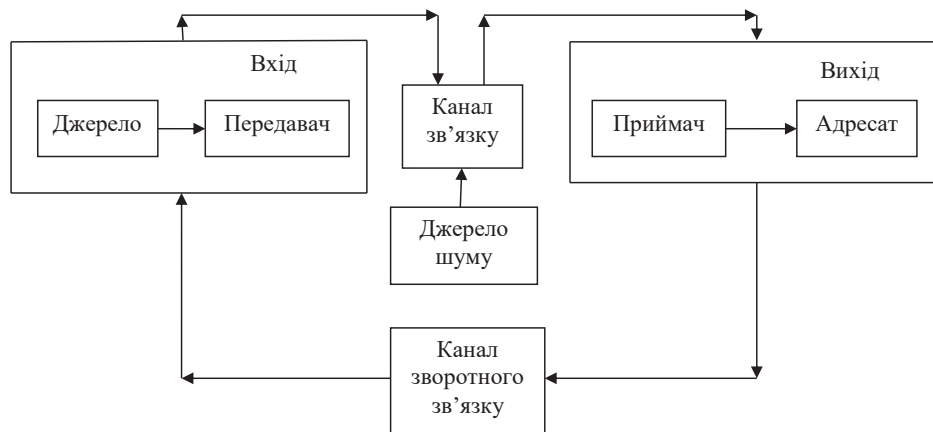


Схема. Системи зв'язку.

Співвідношення між цими функціями може бути представлено у вигляді графіка Г. Кастлера [10]. Було встановлено, що:

$$H(x,y) = H(x) + H(y/x) = H(y) + H(x/y) = H(x) + H(x/y), \text{ також}$$

$$J(x,y) = H(x) - H(x/y) = H(y) - H(y/x) = H(x,y) - [H(x/y) + H(y/x)].$$

У каналі зв'язку за наявності шуму  $H(x/y) > 0$ , а  $J(x,y) < H(x)$ . В каналі, вільному від шуму,  $H(x/y) = 0$  і  $H(y,x) = 0$ . Тому,  $J = H(y) = H(x,y)$ .

Вираз  $H(x,y) = H(x) + H(y/x) = H(y) + H(x/y)$ , по суті, є математичним формулюванням десятої теореми Шеннона (теорема передачі інформації у каналі з шумом). У викладі Г. Кастлера [10] вона звучить так: якщо деяку кількість інформації потрібно передати з ідеальною надійністю при наявності шуму, то необхідно забезпечити таку кількість надмірної інформації, яка буде дорівнювати кількості ненадійності (еквівокації), викликаній шумом.

Як відмічає Шеннон [11], з цього випливає, що умовна ентропія  $H(x/y)$  – це та кількість додаткової інформації, яка має бути витрачена на корекцію інформації, яка приймається для попередження її спотворення. При цьому, якщо пропускна спроможність каналу корекції менше потреби в додатковій  $H(x/y)$ , то довершена корекція інформації, яка передається, буде неможлива. Під пропускною спроможністю каналу зв'язку розуміють максимально можливу швидкість передачі:

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{[H(x) - H(x/y)] \max}{T}.$$

При цьому швидкість передачі інформації можна виражати в бітах (через ентропію) на 1 с або на один символ [12]. Останній варіант дозволяє зв'язати швидкість передачі з надлишковістю ( $R$ ) та відносною ентропією ( $H$ ). Кастлер [10], посилаючись на принцип Данкова, відмічає, що останній належать до «економіки» передачі біологічної інформації. Надлишковість інформації потребує додаткових матеріальних затрат. Унаслідок цього в боротьбі за існування організм не може безмежно збільшувати надлишковість для ефективної боротьби з інформаційним шумом. Він повинен накопичити лише оптимальну кількість надлишкової інформації, яка забезпечить існування організму. За Данковим [13], будь-який організм наближається до цього оптимуму. З цього можна зробити висновок, що кожен організм володіє обмеженими запасами надлишкової інформації і, унаслідок цього, його опірність інформаційному шуму не безмежна. Вичерпання запасів надлишкової інформації призводить до неможливості корегувати шум до оптимального рівня. Це, у свою чергу, створює загрози для гомеостазу організму.

Ashby [14] вперше зазначив, що в десятій теоремі Шеннона міститься кібернетичний принцип

регуляції гомеостазу. Відхилення від параметрів гомеостазу можуть свідчити про порушення інформаційних механізмів організму. При передачі інформації у системах зв'язку організму в нормі вважається, що сигнали, відправлені джерелом, досягають приймача без відчутних шумових спотворень, чим забезпечується однозначність інформації на вході та на виході системи.

Тому в нормі інформаційні функції тотожні:

$$H(x) = H(y) = H(x, y) = J(x, y).$$

Таким чином, інформація, відправлена передавачем, буде дорівнювати отриманій приймачем. У нормальному (здоровому) стані організму ентропія будь-якої системи може бути прийнята за ентропію входу або виходу, або сумісну:

$$H_{\text{норм}} = H(x) = H(y) = H(x, y).$$

При порушенні нормального статусу організму (хвороба, стрес тощо) інформація буде передаватись по каналу зв'язку з шумом, що завадить ідентичності переданої і отриманої інформації. До ентропії входу буде додаватись ненадійність (еквівокація) виходу, а до ентропії виходу – ненадійність входу.

Отже, ентропія системи при патології ( $H_{\text{патол}}$ ) є сумівною ентропією входу та виходу в умовах впливу інформаційного шуму:

$$H_{\text{патол}} = H(x, y) = H(x) + H(y/x) = H(y) + H(x/y).$$

Оскільки  $H_{\text{норм}} = H(x) + H(y)$ , можна вважати, що:

$$H_{\text{патол}} - H_{\text{норм}} = H(y/x) = (x/y).$$

Таким чином, різниця ентропій патології і норми дає величину ненадійності (еквівокації) передачі інформації при патології. Враховуючи те, що еквівокація може бути зумовлена витратами надлишковості, різниця надлишковості в нормі ÷ патології зв'язана з ентропіями таким чином:

$$R_{\text{норм}} - R_{\text{патол}} = \frac{H_{\text{патол}} - H_{\text{норм}}}{H_{\text{max}}}, \text{ звідки}$$

$$(R_{\text{норм}} - R_{\text{патол}}) \times H_{\text{max}} = H_{\text{патол}} - H_{\text{норм}} = H(x/x)$$

З цього випливає, що еквівокація пропорційна різниці надлишкової норми і патології, а також максимальній ентропії. Таким чином, для багатоконпонентних систем еквівокація буде більшою, ніж для малокомпонентних.

Інформаційні властивості найбільш притаманні речовинам із специфічними властивостями та біологічними функціями. До них відносять перш за все білки, які утворюють в організмі складну багатоконпонентну систему, зміни в якій приводять до



порушення інформації. В. С. Улащик дав інформаційну оцінку змін у білковому спектрі сироватки крові й печінки кроликів з експериментальним атеросклерозом під впливом мінеральних ванн різного складу. Як видно із дослідів, розвиток атеросклерозу супроводжувався несприятливими змінами в системі білків, про що свідчать збільшення інформаційної ентропії та зменшення надлишковості. Призначення курсу ванн приводило до помітного зниження ентропії і підвищення надлишковості, що є показником росту впорядкованості в білкових системах крові та печінки.

Найефективнішим виявилось використання хлоридно-натрієвих ванн з мінералізацією 10 г/л. До такого ж висновку, який ґрунтується на багатовислідженнях, прийшов і Д. Г. Григор'ян [15]. Таким чином, простий розрахунок інформаційних характеристик білкового спектра дає можливість зробити висновок про терапевтичну ефективність того чи іншого бальнеологічного комплексу, що узгоджується з результатами трудомістких клініко-біохімічних досліджень.

Використання при вищеприведеній патології мікрохвильового опромінення спричинило несприятливі зміни в організмі тварин [15]. Результати інформаційної оцінки даних підтвердили висновки авторів: мікрохвилі приводять до збільшення ентропії і зменшення надлишковості інформації в

системі білків. Зазначені зміни інформаційних характеристик свідчать про порушення в системі білкового гомеостазу та деградації.

У лабораторії В. С. Улащика вивчали вплив мікрохвиль на перебіг токсичного гепатиту в кроликів. Використовували мікрохвилі потужністю 2; 5; 10; 15 Вт та чергування потужностей 5 і 10 Вт. Останній варіант виявився найефективнішим. Відбулось майже повне відновлення впорядкованості в системі білків та значно підвищились надійність її функціонування.

## ВИСНОВКИ

1. Інформаційні характеристики можна використовувати в якості кількісних критеріїв оцінки ефективності лікування та вибору найоптимальніших методів.

2. Досвід клінічного використання гальванізації та лікарського електрофорезу свідчить про ефективність використання гальванічного струму щільністю 0,03–0,05 мА/см<sup>2</sup>.

3. Наведені матеріали є перспективними у використанні прикладної теорії інформації в медико-біологічних дослідженнях.

4. Теорію інформації можна застосовувати для визначення чутливості біохімічних систем до фізичних факторів, встановлення оптимального діапазону їх дії та оцінки ефективності медичної реабілітації при різних захворюваннях.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Біла книга з фізичної та реабілітаційної медицини в Європі // Український журнал фізичної та реабілітаційної медицини. – 2018. – № 2. – С. 113–127.
2. Застосування медичної інформаційної системи в організації та управлінні реабілітаційно-відновлювальним лікуванням постінсультних хворих в санаторно-курортній установі : методичні рекомендації / О. П. Мінцер, С. М. Злепко, І. І. Хаїмзон та ін. – К., 2012. – 20 с.
3. Авралева А. И. Белково-коллоидные сдвиги в сыворотке крови у больных с заболеваниями сердечно-сосудистой системы при недостаточности кровообращения : автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. мед. наук / Витеб. гос. мед. ин-т. – Минск, 1963. – 24 с.
4. Бандарин В. А. Кибернетика в медицине / В. А. Бандарин. – Минск, 1968.
5. Улащик В. С. В кн.: Актуальные вопросы невропатологии и нейрохирургии / В. С. Улащик. – Минск, 1972. Вып. 5. – С. 235–242.
6. Колісник П. Ф. Проблеми підготовки лікарів з питань медичної реабілітації / П. Ф. Колісник // Вісник

Вінницького національного медичного університету. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 441–445.

7. Килівник В. С. Інформаціологічні моделі функціональних систем організму та їх роль у прийнятті клінічних рішень / В. С. Килівник, О. О. Галаченко, І. В. Кузьмін // Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України. – 2009. – № 4. – С. 86–90.

8. Herdan G. // . Klin. Wschr. – 1955. – Vol. 33 (21/22). – P. 538.

9. Rapoport S. M. Medizinische Biochemie / S. M. Rapoport. – Berlin; 1969.

10. Кастлер Г. В. Теория информации в биологии / Г. В. Кастлер. – М., 1960. – 183 с.

11. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М., 1963.

12. Кастлер Г. В. Возникновение биологической организации / Г. В. Кастлер. – М., 1967.

13. Dancoff S. M. In information theory in biology urbana / S. M. Dancoff, H. Quastler. – 1958.

14. Ashby W. R. Cybernetica. – 1958.

15. Григор'ян Д. Г. Вопросы бальнео- и физиотерапии (труды ЦНИИКИФ) / Д. Г. Григор'ян. – М., 1970.

## REFERENCES

1. [A white book of physical medicine and rehabilitation medicine in Europe]. Ukr. zhurn fiz i reab med. 2018;2: 113-27. Ukrainian.
2. Mintser OP, Zlepko SM, Khaimzon II, Azarkhov OYu, Laduba YuM, Babintseva LYu, Kylyvnyk VS. Involvement of the medical information system in the organization and management of the rehabilitation and rehabilitation of the post-stroke illnesses in the sanatorium-resort setting. [Застосування медичної інформаційної системи в організації та управлінні реабілітаційно-відновлювальним лікуванням постінсультних хворих в санаторно-курортній установі: методичні рекомендації] Kyiv; 2012. Ukrainian.
3. Avrileva AI. Protein-colloidal changes in blood serum in patients with diseases of the cardiovascular system with circulatory failure. Extended abstract of Candidate's thesis. Minsk; 1963. Russian.
4. Bandarin VA. Cybernetics in medicine. [Кибернетика в медицине] Minsk; 1968. Russian.
5. Ulashchik VS. Actual issues of neuropathology and neurosurgery. [Актуальные вопросы невропатологии и нейрохирургии] Minsk; 1972. Russian.
6. Kolisnyk PF. [Problems of training physicians in medical rehabilitation]. Visn Vinn nats univer. 2013;2: 441-45. Ukrainian.
7. Kylyvnyk VS, Halachenko OO, Kuzmin IV. Information models of organism's functional systems and their role in clinical decision making. Visn sots hihieny i orhanizatsii okhorony zdorovia. 2009;4: 86-90. Ukrainian.
8. Herdan G. Klin Wschr. 1955;33(21/22): 538.
9. Rapoport SM. Medizinische Biochemie. Berlin; 1969.
10. Kastler GV. Information Theory in Biology. [Теория информации в биологии] Moscow; 1960. Russian.
11. Shennon K. Works on information theory and cybernetics. [Работы по теории информации и кибернетике] Moscow; 1963. Russian.
12. Kastler GV. The emergence of a biological organization. [Возникновение биологической организации] Moscow; 1967. Russian.
13. Dancoff SM, Quastler H. In Information Theory in Biology Urbana; 1958.
14. Ashby WR. Cybernetica; 1958.
15. Grigor'yan DG. Questions of balneotherapy and physiotherapy. [Вопросы бальнео- и физиотерапии (труды ЦНИИКИФ)] Moscow; 1970. Russian.

Отримано 02.09.19