

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АРМЕНИИ
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE OF ARMENIA

ISSN 0321-1339

Ջ Ե Կ ՈՒ Յ Ց Ն Ե Ր
Д О К Л А Д Ы
R E P O R T S

2019

Երևան

Երևան

Yerevan

Հիմնադրվել է 1944թ.: Լույս է տեսնում տարին 4 անգամ
Основана в 1944 г. Выходит 4 раза в год

Founded in 1944. Published quarterly

Գլխավոր խմբագիր՝ ակադեմիկոս Ռ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

Խմբագրական խորհուրդ՝ ակադեմիկոս Գ. Ե. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, ակադեմիկոս Վ. Ս. ԶԱՔԱՐՅԱՆ,
ակադեմիկոս Լ. Ա. ԹԱՎԱԴՅԱՆ, ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ Ռ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, ակադեմիկոս Է. Մ.
ՂԱԶԱՐՅԱՆ, ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Լ. Ռ. ՄԱՆՎԵԼՅԱՆ (գլխ. խմբագրի տեղակալ), ակադեմիկոս Յու.
Հ. ՇՈՒԿՈՒՐՅԱՆ, ակադեմիկոս Դ. Մ. ՍԵԴՐԱԿՅԱՆ, Գ. Ա. ԱԲՐԱՄՅԱՆ (պատ. քարտուղար)

Главный редактор академик Р. М. МАРТИРОСЯН

Редакционная коллегия: чл.-кор. НАН РА Р. М. АРУТЮНЯН, академик Г. Е. БАГДАСАРЯН, академик В. С.
ЗАХАРЯН, академик Э. М. КАЗАРЯН, чл.-кор. НАН РА Л. Р. МАНВЕЛЯН (зам. главного редактора),
академик Д. М. СЕДРАКЯН, академик Л. А. ТАВАДЯН, академик Ю. Г. ШУКУРЯН, Г. А. АБРАМЯН (отв.
секретарь)

Editor-in-chief academician R. M. MARTIROSYAN

Editorial Board: corresponding member of NAS RA R. M. AROUTIUNIAN, academician G. E. BAGDASARIAN,
academician E. M. KAZARYAN, corresponding member of NAS RA L. R. MANVELYAN (associate editor),
academician D. M. SEDRAKIAN, academician Yu. H. SHOUKOURIAN, academician L. A. TAVADYAN,
academician V. S. ZAKARYAN, G. A. ABRAHAMYAN (executive secretary)

Խմբագրության հասցեն՝ 0019, Երևան 19, Մարշալ Բաղրամյան պող. 24գ.
Адресредакции: 0019, Ереван 19, просп. Маршала Баграмяна 24г

Communication links: address – 24g Marshal Bagramian Ave., Yerevan, 0019, Armenia

Phone:(37410)56-80-67*URL:*<http://elib.sci.am> *e-mail:* rnas@sci.am

©НАН РА. Президиум. 2019
©Издательство “Титутюн”
НАН РА. 2019

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱ

Վ. Կ. Լեոնտին, Ղ. Լ. Մովսիսյան, Ժ. Գ. Մարգարյան – Հարաբերություններ կապուլինների միջև	195
Ռ. Վ. Դալլաքյան – Վերբիցկու մի թեորեմի անալոգը Ջրբաշյանի արտադրյալների համար	204

ՄԵԽԱՆԻԿԱ

Մ. Վ. Բելուբեկյան, Ս. Վ. Մարգարյան – Ալիքների տարածումը բարակ շերտ - կիսատարածություն համակարգում խառը եզրային պայմաններով	209
Ս. Հ. Մարգարյան – Գրաֆենի՝ իր հարթության մեջ դեֆորմացիայի դիսկրետ և կոնտինուալ-մոմենտային մոդելները	216

ԱՌԱՋԳԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆ

Ա. Մ. Մարգարյան – Բարակ շրջանային սեկտորի հետ երկու սեղմման նկատմամբ բացարձակ կոշտ և ձգման նկատմամբ բացարձակ ճկուն վերդրակների փոխադրեցության կոնտակտային խնդրի մասին: Մաս II	224
---	-----

ՖԻԶԻԿԱ

Ռ. Հ. Ալանակյան – Երկու անգամ լիցքավորված բոզոնները լեպտոնային արագացիչներում	232
---	-----

ՔԻՄԻԱԿԱՆ ՖԻԶԻԿԱ

Ս. Հ. Մինասյան, Լ. Ն. Մխիթարյան, Զ. Հ. Մանուկյան, Լ. Ա. Թավադյան – Վիտամին B12-ի հակապերօքսիդադիկալային ակտիվությունը	240
---	-----

ԵՐԿՐԱՖԻԶԻԿԱ

Ռ. Ա. Փաշայան, Լ. Վ. Հարությունյան – Երկրային ընդերքի երկրադինամիկայի ժամանակակից փոփոխությունները Հայաստանի տարածքում	249
--	-----

ՃԱՌԱԳԱՅԹԱՅԻՆ ԿԵՆՍԱՖԻԶԻԿԱ

Հ. Պ. Մարգարյան, Ն. Ս. Բաղդասարյան – Ճառագայթային ախտահարման կենսա-դոզաչափության հիմնախնդիրը և նրա լուծումը էրիթրոցիտների միկրոպատկերների թվային վերամշակման մեթոդով	258
--	-----

ՄԻԿՐՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ, ԲԺՇԿԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ

Վ. Մ. Հարությունյան – Բժշկական ախտորոշում միկրոէլեկտրոնային կիսահաղորդային զազային սենսորներով	265
--	-----

ԿԵՆՍԱՔԻՄԻԱ

Գ. Ա. Հովհաննիսյան, Ֆ. Պ. Սարուխանյան, Օ. Վ. Հունանյան, Ն. Հ. Բարխուդարյան – Կատալազի ակտիվության փոփոխությունը գինեկոլոգիական քաղցկեղի փուլերից կախված	274
---	-----

ԲՈՒՄԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

Ժ. Հ. Վարդանյան, Ս. Ա. Կտրակյան – Տարբեր աշխարհագրական ծագման և տաքսոնոմիական խմբերի ծառաբույսերի գեղազարդության համեմատական գնահատականը Երևան քաղաքի կանաչ տնկարկներում	281
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

<i>В. К. Леонтьев, Г. Л. Мовсисян, Ж. Г. Маргарян</i> – Отношения между каналами связи	195
<i>Р. В. Даллакян</i> – Аналог одной теоремы Вербицкого для произведений Джрбашяна	204

МЕХАНИКА

<i>М. В. Белубекян, С. В. Саркисян</i> – Распространение волн в системе тонкий слой – полупространство со смешанными граничными условиями	209
<i>С. О. Саркисян</i> – Дискретная и континуально-моментная модели графена для деформаций в своей плоскости	216

ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ

<i>А. М. Саргсян</i> – Контактная задача о взаимодействии двух абсолютно жестких при растяжении и гибких при изгибе накладок с тонким круговым сектором. Часть II	224
---	-----

ФИЗИКА

<i>Р. А. Аланакян</i> – Двукратно заряженные бозоны на лептонных коллайдерах	232
--	-----

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

<i>С. Г. Минасян, Л. Н. Мхитарян, З. О. Манукян, Л. А. Тавадян</i> – Антипероксидная активность витамина В12	240
--	-----

ГЕОФИЗИКА

<i>Р. А. Пашаян, Л. В. Арутюнян</i> – Современные изменения геодинамики земной коры территории Армении	249
--	-----

РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА

<i>Г. П. Саркисян, Н. С. Багдасарян</i> – Проблема биодозиметрии лучевых поражений и ее решение методом цифровой обработки микроизображений эритроцитов	258
---	-----

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА, МЕДИЦИНА

<i>В. М. Арутюнян</i> – Медицинская диагностика с использованием микроэлектронных полупроводниковых газовых сенсоров	265
--	-----

БИОХИМИЯ

<i>Г. А. Оганнисян, Ф. П. Саруханян, О. В. Унбян, Н. А. Бархударян</i> – Изменения активности каталазы в зависимости от стадии гинекологического рака ...	274
---	-----

БОТАНИКА

<i>Ж. А. Вардоян, С. А. Ктракян</i> – Сравнительная оценка декоративности древесных растений различного географического происхождения и таксономических групп в зеленых насаждениях г. Еревана	281
--	-----

CONTENTS

MATHEMATICS

<i>V. K. Leontiev, G. L. Movsisian, Zh. G. Margaryan</i> – Channel Relations between Channels	195
<i>R. V. Dallakyan</i> – On a Verbitsky's Type Theorem for M. M. Djrbashyan Products	204

MECHANICS

<i>M. V. Belubekyan, S. V. Sarkisyan</i> – Propagation of Waves in a Thin Layer – Half-Space System with Mixed Boundary Conditions	209
<i>S. H. Sargsyan</i> – Discrete and Continual-Moment Models of Graphene for Deformations in Its Plane	216

ELASTICITY THEORY

<i>A. M. Sargsyan</i> – Contact Problem on the Interaction of Two Straps Absolutely Rigid in Tension and Flexible in Bending with a Thin Circular Sector. Part II	224
---	-----

PHYSICS

<i>R. H. Alanakyan</i> – Doubly Charged Bosons on Lepton Colliders	232
--	-----

CHEMICAL PHYSICS

<i>S. H. Minasyan, L. N. Mkhitarian, Z. H. Manukyan, L. A. Tavadyan</i> – Antiperoxyradical Activity of Vitamin B12	240
---	-----

GEOPHYSICS

<i>R. A. Pashayan, L. V. Harutyunyan</i> – Modern Changes in the Geodynamics of the Earth's Crust in Armenia	249
--	-----

RADIATION BIOPHYSICS

<i>H. P. Sargsyan, N. S. Baghdasaryan</i> – The Problem of Radiation Injury Biodosimetry and Solving it by the Method of Digital Processing of Erythrocyte Micro-images	258
---	-----

MICROELECTRONICS, MEDICINE

<i>V. M. Aroutiounian</i> – Medical Diagnostics Using Microelectronic Semiconductor Gas Sensors	265
---	-----

BIOCHEMISTRY

<i>G. A. Hovhannisyan, F. P. Sarukhanyan, O. V. Hunanyan, N. H. Barkhudaryan</i> – Changes in Catalase Activity Depending on Stages of Gynecological Cancers	274
--	-----

BOTANY

<i>Zh. H. Vardanyan, S. A. Ktrakyan</i> – Comparative Assessment of Decorativity of the Woody Plants of Various Geographic Origin and Taxonomic Groups in Green Stands of Yerevan	281
---	-----

МАТЕМАТИКА

УДК 621.391.15

В. К. Леонтьев¹, Г. Л. Мовсисян², Ж. Г. Маргарян³

Отношения между каналами связи

(Представлено академиком Ю. Г. Шукуряном 12/VII 2019)

Ключевые слова: каналы связи, словарные функции, комбинаторные каналы, алгебраические каналы, аддитивные каналы, коды.

Введение. Семейство каналов связи довольно разнообразно, и подробное теоретическое изучение многих из них встречает серьезные математические трудности. В то же время имеется целый ряд каналов связи, которые в содержательном смысле похожи друг на друга и поэтому могут быть исследованы одинаковыми методами.

В настоящей статье мы рассматриваем классификацию таких каналов, используя способ классификации, позволяющий искать каналы с «наилучшими» и «наихудшими» корректирующими свойствами, соответствующие общепринятой точке зрения.

§1. Каналы связи и словарные функции. Пусть $B = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ – конечный алфавит и B^* – множество всех слов конечной длины над алфавитом B . Словарная функция – это произвольное частичное отображение ψ следующего вида:

$$B^* \xrightarrow{\psi} B^*.$$

Таким образом, словарная функция отображает слово в слово. Примеров таких функций великое множество. Это и представление вещественных чисел в позиционных системах счисления, это и так называемые функции k -значной логики, это и машины Тьюринга (ТМ), продукции Поста и т.п. [1].

Понятие канала связи не имеет общего математического определения, хотя во многих ситуациях допускается адекватная формулировка в терминах, близких к теории вероятности. Так получаются определения двоично-симметричного канала, гауссовского канала и др. Мы будем рассматривать канал как преобразователь информации, и если принять тезис о том, что в любом канале связи происходит преобразование одних слов в

другие, то достаточно общий канал можно описать следующим образом.

Заданы некоторое множество $\Psi = \{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_m\}$ частичных словарных функций $B^* \xrightarrow{\psi_i} B^*, i = \overline{0, m}$, и многозначное отображение

$$f(x) = (\psi_0(x), \psi_1(x), \dots, \psi_m(x)),$$

где $x \in W \subseteq B^*$. Содержательно это означает, что если $x \in W$, то после передачи по каналу $K(\Psi)$ это слово переходит в одно из слов $\{\psi_0(x), \psi_1(x), \dots, \psi_m(x)\} \subseteq W$.

Множество всех обратимых отображений $\{\psi_i\}, \psi_i(W) \subseteq W$ обозначим через T . При этом все суперпозиции $\psi_{i_1} \psi_{i_2} \dots \psi_{i_k}$ функции ψ_{i_j} из множества Ψ определены на W .

Определение. *Комбинаторным каналом* связи $K(\Psi)$ называется многозначное отображение

$$f(x) = (\psi_0(x), \psi_1(x), \dots, \psi_m(x)). \quad (1)$$

Формулу (1) следует понимать следующим образом. На вход канала подается слово v . На выходе получается ровно одно из значений $\psi_0(v), \psi_1(v), \dots, \psi_m(v)$. Фраза «одно из значений» интерпретируется в вероятностном смысле как равномерное распределение на всех словарных функциях $\psi_0(x), \psi_1(x), \dots, \psi_m(x)$. Точнее, если на вход канала подается слово v , то с вероятностью $\frac{1}{m+1}$ оно переходит в слово $\psi_i(v)$.

§2. Восстановление искаженного сигнала. После передачи некоторого слова v по имеющемуся каналу связи на выходе мы получаем слово u . В классической постановке требуется восстановить исходное слово v по его искаженному образу u с максимально возможной достоверностью. Точная постановка задачи борьбы с искажениями, происходящими в канале связи, принадлежит К. Шеннону [2]: на входе канала известно некоторое множество слов из B^n , которое содержит все потенциально возможные сообщения, годные для передачи. Множество сообщений на выходе мы будем считать некоторым подмножеством из B^n . Проблема кодирования состоит в выборе такого семейства сообщений $V = \{v_0, v_1, \dots, v_N\}$, что при получении на выходе канала сообщения $u \in B^n$ мы можем однозначно декодировать переданное сообщение.

Следуя стандартным традициям, любое подмножество V из B^n мы будем называть кодом V , который и используется для связи, т.е. передаваться по каналу могут только слова кода V . Таким образом, каждое слово u , полученное на выходе канала, является образом кодового слова. И мы хотим восстановить исходное слово $v \in V$ по его образу. Здесь основное искусство состоит в правильном выборе кода V , позволяющего однозначно восстановить исходное сообщение по любому искаженному сигналу.

Что касается выбора кода V , то это фактически выбор необходимой избыточности в передаваемой информации для обеспечения нужной

достоверности. Поскольку избыточность приводит к увеличению времени работы канала и, следовательно, уменьшению скорости передачи информации в канале, то при принятии решения, учитывая как характеристики канала, так и способ декодирования, мы должны обеспечить баланс между необходимой достоверностью и скоростью передачи.

Возможность нахождения такого баланса основывается на теореме Шеннона: для определенного канала связи существуют коды со скоростью передачи, меньшей пропускной способности канала, обеспечивающие сколь угодно большую достоверность.

Определение. Множество $V \subseteq B^n$ называется кодом, исправляющим ошибки канала $K(\Psi)$, если выполнено условие:

$$\psi_i(u) \neq \psi_j(v) \quad (2)$$

для всех i и j и для всех слов $u, v \in V$.

Условие (2) означает, что последствия действий канала $K(\Psi)$ на кодовые слова различны и поэтому искажения могут быть обнаружены и исправлены.

В дальнейшем обозначим через $V(\Psi)$ код, исправляющий ошибки канала $K(\Psi)$. В терминах, введенных выше, основная задача при заданном канале состоит в построении кода $V(\Psi)$ максимальной мощности.

Ясно, что мощность кода $V(\Psi)$ зависит от «структуры» и мощности множества Ψ , «порождающего» канал $K(\Psi)$, и т.д. В других терминах, условие (2) можно естественным образом увязать с понятием «окрестности» и сформулировать эквивалентные понятия, используемые в дальнейшем.

Окрестность k -го порядка слова v определим следующим образом (индуктивно): $\Psi^k(v) = \Psi^1(x)$, $x \in \Psi^{k-1}(v)$, где $\Psi^0(v) = v$, $\Psi^1(v) = \Psi(v)$.

При этом выполняются включения $\Psi^0(v) \subseteq \Psi^1(v) \subseteq \dots \subseteq \Psi^k(v)$.

В терминах окрестностей условие, что код $V = \{v_0, v_1, \dots, v_N\}$ исправляет ошибки канала $K(\Psi)$, можно сформулировать следующим образом:

$$\Psi^1(v_i) \cap \Psi^1(v_j) = \emptyset, \quad i \neq j. \quad (3)$$

Нетрудно проверить, что условия (2) и (3) являются эквивалентными.

Определение кода V , исправляющего ошибки канала $K(\Psi)$, в значительной мере копирует классическое определение кода, исправляющего искажения типа $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$ в двоичном симметричном канале [2].

В содержательном смысле код V должен быть устроен так, чтобы по любому искаженному сигналу исходное сообщение восстанавливалось однозначно, т.е. предполагается существование однозначного декодирования. То обстоятельство, что код V исправляет ошибки канала $K(\Psi)$, можно формально записать двухместным предикатом:

$$X(\Psi, V) = \begin{cases} 1, & \text{если } V \text{ исправляет ошибки } K(\Psi), \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Предикат $X(\Psi, V)$ описывает «взаимоотношения» канала $K(\Psi)$ и кода V и обладает следующим свойством: $X(\Psi, V) = X(\varphi\Psi, V)$, где φ – произвольное обратимое преобразование из T .

Следовательно, код V исправляет или не исправляет ошибки каналов $K(\Psi)$ и $K(\varphi\Psi)$ одновременно, т.е. каналы $K(\Psi)$ и $K(\varphi\Psi)$ для обратимого преобразования φ обладают одинаковыми свойствами в смысле коррекции ошибок, поэтому каналы $K(\Psi)$ и $K(\varphi\Psi)$ естественно считать неразличимыми, и в дальнейшем мы всегда будем считать, что $\psi_0(x) = x$, что можно интерпретировать как возможность безошибочной передачи слова по этому каналу, $W = B^n \subseteq B^*$, где $B = \{0, 1\}$. Следовательно, на множестве B^n действует группа преобразования T , которая переводит слово из B^n в слово из этого же множества. Подобные допущения упрощают многие технические детали и не влияют, как мы увидим далее, на ситуацию в целом. При этом изложенный материал становится более доступным для понимания.

В основе понятия классификации семейства каналов $\{K(\Psi)\}$ лежит соотношение канала $K(\Psi)$ и кода V , т.е. значение предиката $X(\Psi, V)$. Следующее определение представляет один из вариантов разбиения каналов связи на классы эквивалентности.

Введем на множестве каналов бинарное отношение

$$K(\Psi) \leq K(\Phi) \tag{4}$$

следующим образом:

$K(\Psi) \leq K(\Phi)$, если $(X(\Phi, V) = 1) \rightarrow (X(\Psi, V) = 1)$ для всех $V \subseteq B^n$.

Определение. Канал $K(\Psi)$ слабее канала $K(\Phi)$, если любой код V , исправляющий ошибки канала $K(\Phi)$, исправляет и ошибки канала $K(\Psi)$.

Это бинарное отношение $K(\Psi) \leq K(\Phi)$ определяет отношение предпорядка на множестве всех каналов $\{K(\Psi)\}$. Однако отношения $K(\Psi) \leq K(\Phi)$, $K(\Phi) \leq K(\Psi)$ не влекут $K(\Psi) = K(\Phi)$, т.е. отношение (4) не является частичным порядком.

Ясно, что всегда имеет место $\Psi \subseteq \Phi \rightarrow K(\Psi) \leq K(\Phi)$. При этом из $K(\Psi) \leq K(\Phi)$ не всегда следует, что $\Psi \subseteq \Phi$.

Пример 1. Рассмотрим каналы $K(\Phi_1), K(\Phi_2), K(\Phi_3)$, где $\Phi_1(x) = \{x + y_0, \dots, x + y_m\}$, $\Phi_2(x) = \{x + y_0, \dots, x + y_m, x + y_{m-1} + y_m\}$, $\Phi_3(x) = \{x + y_0, \dots, x + y_m, x + y_{m+1}\}$.

Нетрудно убедиться, что $K(\Phi_3) \leq K(\Phi_2) \leq K(\Phi_1)$ и $K(\Phi_2) \leq K(\Phi_3)$. Однако в общем случае ни одно из следующих соотношений не имеет места: $\Phi_1 = \Phi_2$, $\Phi_2 = \Phi_3$, $\Phi_2 \subseteq \Phi_3$, $\Phi_3 \subseteq \Phi_2$.

Определение. Если $K(\Psi) \leq K(\Phi)$ и $K(\Phi) \leq K(\Psi)$, то каналы $K(\Psi)$ и $K(\Phi)$ называют эквивалентными и обозначают $K(\Psi) \sim K(\Phi)$.

Формально отношение эквивалентности каналов $K(\Psi)$ и $K(\Phi)$ можно записать так: $K(\Psi) \sim K(\Phi) \Leftrightarrow X(\Psi, V) = X(\Phi, V)$ для любого $V \subseteq B^n$.

Класс эквивалентности $M(\Psi)$ определяется как множество $M(\Psi) = \{K(\Phi); K(\Phi) \sim K(\Psi)\}$.

Ясно, что для любых каналов $K(\Psi), K(\Phi)$ из одного класса эквивалентности имеет место равенство $M(\Psi) = M(\Phi)$.

§3. Отношения между алгебраическими каналами связи. Определение [3]. Комбинаторный канал $K(\Psi)$ называется *алгебраическим каналом*, если выполняется условие

$$\psi_i \in \Psi \rightarrow \psi_i^{-1} \in \Psi. \quad (5)$$

Это условие требует, чтобы любое «преобразованное» слово могло быть возвращено к исходному виду путем тех же самых трансформаций. Отметим, что любой аддитивный канал удовлетворяет условию (5) и является алгебраическим [4-6]. Однако не все комбинаторные матричные каналы являются алгебраическими, например, матричный канал с выпадением символов [7, 8]. При этом матричный канал с инверсией является алгебраическим [7].

Пусть $\Psi = \{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_{m_1}\}$, $\Phi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{m_2}\}$.

Теорема 1. Алгебраические каналы $K(\Psi)$ и $K(\Phi)$ эквивалентны тогда и только тогда, когда существует $\varphi \in T$ такое, что $K(\Phi_1)$ является алгебраическим и

$$\Psi^2 = \Phi_1^2,$$

где $\Phi_1 = \{f_0, f_1, \dots, f_{m_2}\}$, $f_i = \varphi \varphi_i$.

Доказательство. Достаточность. Пусть для некоторых $\varphi \in T$ канал $K(\Phi_1)$ является алгебраическим и $\Psi^2 = \Phi_1^2$. Предположим, что код $V(\Psi)$ не исправляет ошибки канала $K(\Phi)$. Т.е. имеем $X(\Phi, V(\Psi)) = 0$.

Отсюда следует, что $\varphi_i(u) = \varphi_j(v)$ и поэтому $f_i(u) = f_j(v)$ для некоторых $0 \leq i, j \leq m_2$ и $u, v \in V(\Psi)$, $i \neq j$, $u \neq v$. Следовательно,

$$f_j^{-1} f_i(u) = v. \quad (6)$$

Поскольку $f_j^{-1} \in \Phi_1$ и $\Psi^2 = \Phi_1^2$, то из (6) следует, что $v = f_j^{-1} f_i(u) \in \Psi^2(u)$. Т.е. $v = \psi_r \psi_s(u)$ для некоторых $0 \leq r, s \leq m_1$. Следовательно $\psi_r^{-1}(v) = \psi_s(u)$.

Отсюда следует, что $X(\Psi, V(\Psi)) = 0$, что является противоречием.

Необходимость. Теперь предположим, что $K(\Psi) \sim K(\Phi)$, но для любого $\varphi \in T$, для которого $K(\Phi_1)$ является алгебраическим каналом, имеем $\Psi^2 \neq \Phi_1^2$.

Не нарушая общности, предположим, что существуют $u \neq x$, $u \in \Psi^2(x)$, $u \notin \Phi_1^2(x)$, и рассмотрим код $V = \{x, u\}$. Из условия $u \notin \Phi_1^2(x)$ следует, что $u \neq f_i f_j(x)$ для всех $0 \leq i, j \leq m_2$. Значит, $f_i^{-1}(u) \neq f_j(x)$, и, следовательно, поскольку канал $K(\Phi_1)$ алгебраический, то $f_l = f_i^{-1} \in \Phi_1$ и $f_l(u) \neq f_j(x)$, поэтому $\varphi_l(u) \neq \varphi_j(x)$ для всех $0 \leq l, j \leq m_2$, т.е.

$$X(\Phi, V) = 1. \quad (7)$$

Далее, поскольку $y \in \Psi^2(x)$, то $y = \psi_r \psi_s(x)$ для некоторых $0 \leq r, s \leq m_1$.

Значит, $\psi_r^{-1}(y) = \psi_s(x)$ или $\psi_r^{-1}(y) = \psi_l(y) = \psi_s(x)$ для некоторых $0 \leq l, s \leq m_1$. Следовательно $X(\Psi, V(\Psi)) = 0$, что с учетом (7) противоречит условию $K(\Psi) \sim K(\Phi)$. Теорема доказана.

Следствие. Для алгебраических каналов $K(\Psi)$ и $K(\Phi)$ справедливо:

а) $\Psi^2 = \Phi^2 \rightarrow K(\Psi) \sim K(\Phi)$;

б) $K(\Psi) \leq K(\Phi) \Leftrightarrow \Psi^2 \subseteq (\varphi\Phi)^2$ для некоторого $\varphi \in T$.

Следствие. Для класса эквивалентности алгебраического канала $K(\Psi)$ имеет место

$$M(\Psi) = \{K(\varphi\Phi); \Psi^2 = \Phi^2, \varphi \in T\}.$$

Пример 2. Рассмотрим каналы из примера 1 при $m = 4$, $y_0 = (0000)$, $y_1 = (1000)$, $y_2 = (0100)$, $y_3 = (0110)$, $y_4 = (1010)$. Для алгебраического канала $K(\Phi_4)$ с порождающим множеством

$$\Phi_4(x) = \{Ax, Ax + (0001), Ax + (0010), Ax + (0110), Ax + (0101)\},$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0001 \\ 0010 \\ 0100 \\ 1000 \end{pmatrix}$$

имеем $M(\Phi_1) = M(\Phi_2) = M(\Phi_3) = M(\Phi_4)$.

Пусть $\{K(\Psi)\}$ – семейство всех алгебраических каналов. На этом множестве действует группа преобразования T следующим образом: для любых $K(\Psi)$ алгебраических каналов и $\varphi \in T$ преобразований $\varphi K(\Psi) = K(\varphi\Psi)$.

Таким образом, транзитивное множество, порожденное каналом $K(\Psi)$, выглядит стандартным образом: $G(\Psi) = \{K(\varphi\Psi); \varphi \in T\}$.

Пусть $\bar{G}(\Psi) \subseteq \{K(\Phi); \Phi^2 = \Psi^2\}$ – максимальное по мощности множество (одно из), состоящее из попарно неэквивалентных каналов.

Теорема 2. Семейство всех транзитивных множеств $\{G(\Psi), K(\Psi) \in \bar{G}(\Psi)\}$ порождает разбиение класса эквивалентности $M(\Psi)$. Т.е.

$$M(\Psi) = \bigcup_{K(\Psi) \in \bar{G}(\Psi)} G(\Psi).$$

При этом независимо от того, какие максимальные по мощности $\bar{G}(\Psi)$ выбраны, разбиение $M(\Psi)$ единственное.

Изучение каналов связи мы привели к изучению транзитивных множеств, а изучение транзитивных множеств – к изучению классов эквива-

лентности, которые в дальнейшем можно описать, введя отношения частичного порядка $M(\Psi) \leq M(\Phi)$, если $K(\Psi) \leq K(\Phi)$.

Следствие. Для алгебраических каналов $K(\Psi)$ и $K(\Phi)$ справедливо $M(\Psi) \leq M(\Phi) \Leftrightarrow \Psi^2 \subseteq (\varphi\Phi)^2$ для некоторого $\varphi \in T$. Следовательно, мы приходим к необходимости введения инварианта канала связи, характеризующего канал $K(\Psi)$ и как следствие класс эквивалентности $M(\Psi)$. Роль инварианта для любого $K(\Psi)$ играет множество $\Psi^2(x)$. К сожалению, вопрос «каждое ли подмножество из T является инвариантом какого-то канала» имеет отрицательный ответ. Достаточно рассмотреть следующий пример.

При $m=2$ или 4 для подмножеств $\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m\} \subseteq T$, где $\varphi_i(x) = x + y_i$, не существует алгебраического канала с инвариантом $\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m\}$.

Теорема 3. Если $K(\Psi)$ – алгебраический групповой канал, то:

1. Ψ является инвариантом для всех каналов из $M(\Psi)$;
2. канал связи $K(\varphi\Psi)$ для всех линейных преобразований φ из T является групповым;
3. $K(\Psi)$ имеет максимальную мощность в классе эквивалентности $M(\Psi)$;
4. $M(\Psi) = \{K(\varphi\Psi); \varphi^2 = \Psi, \varphi \in T\}$.

§4. Отношение между аддитивными каналами связи. Пусть $\Psi(0) = \{y_0, y_1, \dots, y_m\}$ – подмножество B^n . Тогда с порождающим множеством Ψ связывается понятие аддитивного канала $K(\Psi)$ следующим образом [9].

Любое из слов $x \in B^n$ в канале $K(\Psi)$ преобразуется в одно из слов вида

$$\psi_0(x), \psi_1(x), \dots, \psi_m(x), \psi_i(x) = x + y_i, i = \overline{0, m}. \quad (8)$$

Таким образом, каждое из преобразований вида (8) осуществляет «сдвиг» на слово y_i . В результате «сдвига» y_i слово x преобразуется в другое слово y_i , которое может совпадать с x , если $y_i = (0 \ 0 \dots 0)$.

Интерес к аддитивному каналу связи как некоторому преобразователю информации объясняется тем обстоятельством, что является естественным обобщением двоично симметричного канала с ограниченным числом искажений $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$, с одной стороны, и освобожден от четких рамок ограниченного выбора, с другой стороны, что позволяет в ряде случаев лучше понять исходную ситуацию.

Предикат $X(\Psi, V)$ описывает «взаимоотношения» аддитивного канала $K(\Psi)$ и кода V и обладает следующими свойствами:

- а) $X(\Psi + u, V + v) = X(\Psi, V)$, где u и v – произвольные слова множества B^n ;
- б) $X(\Psi, V) = X(\varphi\Psi, V)$, где φ – произвольное обратимое преобразование из T ;
- в) $X(\Psi, V) = X(\Phi, \varphi V)$, где $\Phi = \varphi\Psi$, φ – произвольное линейное преобразование из T .

Словесное описание этих свойств предиката $X(\Psi, V)$ состоит в следующем:

а) любые «сдвиги» канала $K(\Psi)$ или кода V не нарушают «взаимоотношения» между ними;

б) код V исправляет или не исправляет ошибки каналов $K(\Psi)$ и $K(\varphi\Psi)$ одновременно. Т.е. каналы $K(\Psi)$ и $K(\varphi\Psi)$ для обратимого преобразования φ обладают одинаковыми свойствами в смысле коррекции ошибок, поэтому аддитивный канал $K(\Psi)$ и канал $K(\varphi\Psi)$ естественно считать неразличимыми;

в) коды V и φV одновременно исправляют или не исправляют ошибки аддитивных каналов, порожденных соответственно Ψ и $\varphi\Psi$.

Теорема 4. Для произвольных аддитивных каналов $K(\Psi)$ и $K(\Phi)$ справедливо следующее:

$$K(\Psi) \sim K(\Phi) \Leftrightarrow \Psi^2 = \Phi^2.$$

Пример 3. Рассмотрим аддитивные каналы, порождающие множества в которых имеют разные мощности: $K(\Phi_1)$, $K(\Phi_2)$, $K(\Phi_3)$ из примера 2.

Нетрудно убедиться, что эти каналы эквивалентны, хотя $|\Phi_1|=5$, $|\Phi_2|=6$, $|\Phi_3|=6$. На самом деле в общем случае мощность канала не является помехой для классификации, а в определенных случаях однозначно определяет класс эквивалентности канала.

Следствие. Для любого аддитивного канала $K(\Psi)$, удовлетворяющего условию $|\Psi| > 2^{n-1} + 1$, имеет место $M(\Psi) = M(\Phi)$, где $\Phi(0) = B^n$.

Следствие. $K(\Psi) \sim K(\Phi)$ тогда и только тогда, когда $\Psi^2 = \Phi^2$.

¹ Московский государственный университет

² Группа Бит, Москва

³ Ереванский государственный университет

e.mail: vkleontiev@yandex.ru, garib@hkzap.ru, j.margaryan@ysu.am

В. К. Леонтьев, Г. Л. Мовсисян, Ж. Г. Маргарян

Отношения между каналами связи

Введено понятие эквивалентности каналов связи с точки зрения исправления возможных ошибок в данных каналах связи. Для алгебраических каналов связи приведены необходимые и достаточные условия эквивалентности. Описаны классы эквивалентности алгебраических каналов.

Վ. Վ. Լեոնտիև, Դ. Լ. Մովսիսյան, Ժ. Գ. Մարգարյան

Հարաբերություններ կապուղիների միջև

Ներմուծված է կապուղիների համարժեքության հասկացությունը կապուղիներում հնարավոր սխալներ ուղղելու տեսանկյունից: Հանրահաշվական կապուղիների

համար տրվում են անհրաժեշտ և բավարար համարժեքության պայմաններ: Նկարագրված են հանրահաշվական կապուղիների համարժեքության դասերը:

V. K. Leontiev, G. L. Movsisian, Zh. G. Margaryan

Channel Relations between Channels

The notion of equivalence of communication channels has been introduced in terms of correcting possible errors in these communication channels. For algebraic communication channels, necessary and sufficient equivalence conditions are given. The equivalence classes of algebraic channels are described.

Литература

1. *Мальцев А. И.* Алгоритмы и рекурсивные функции. М. Наука, Физматлит. 1986. 368 с.
2. *Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А.* Теории кодов, исправляющих ошибки. М. Связь. 1979. 744 с.
3. *Леонтьев В. К., Мовсисян Г. Л.* В кн.: The First International. Algebra and Geometry Conference 16-20 may 2007. Yerevan. Armenia.
4. *Леонтьев В. К., Мовсисян Г. Л.* – Доклады НАН Армении. 2004. Т. 104. № 1. С. 23-27.
5. *Леонтьев В. К., Мовсисян Г. Л., Маргарян Ж. Г.* – Доклады РАН. 2006. Т. 411. № 3. С. 306-309.
6. *Леонтьев В. К., Мовсисян Г. Л., Маргарян Ж. Г.* – Доклады НАН Армении. 2010. Т. 110. № 4. С. 334-339.
7. *Леонтьев В. К., Мовсисян Г. Л., Осипян А.А.* В кн.: Матер. XI междунар. семинара «Дискретная математика и ее приложение». М. Изд-во МГУ. 2012. С. 415-416.
8. *Левенштейн В. И.* – ДАН СССР. 1965. Т. 163. № 4. С. 845-848.
9. *Leontiev V., Movsisyan G., Osipyanyan A.* – Open Journal of Discrete Mathematics (OJDM). 2014. 4. P. 67-76.

МАТЕМАТИКА

УДК 517

Р. В. Даллакян

Аналог одной теоремы Вербицкого
 для произведений Джрбашяна

(Представлено академиком В. С. Захаряном 17/VI 2019)

Ключевые слова: оператор интегро-дифференцирования Римана – Лиувилля, произведение Бляшке, произведение Джрбашяна, последовательность (wN) .

Введение. Пусть $\mathcal{D}$ – единичный круг комплексной плоскости $\mathbb{C}$, $-1 < \alpha < +\infty$ и пусть последовательность $\{a_n\} \subset \mathcal{D}, a_n \neq 0, n = 1, 2, \dots$, такая, что

$$\sum_n (1 - |a_n|)^{1+\alpha} < +\infty. \quad (1)$$

Произведение М. М. Джрбашяна $B_\alpha(z; \{a_n\}), z \in \mathcal{D}$, определяется (см. [1], гл. IX) следующим образом:

$$B_\alpha(z; \{a_n\}) = \prod_n \left(1 - \frac{z}{a_n}\right) \exp\{-W_\alpha(z; a_n)\},$$

где для $\xi \in \mathcal{D}$

$$W_\alpha(z; \xi) = \int_{|\xi|}^1 \frac{(1-x)^\alpha}{x} dx - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Gamma(1+\alpha+k)}{\Gamma(1+\alpha)\Gamma(1+k)} \left\{ \xi^{-k} \int_0^{|\xi|} (1-x)^\alpha x^{k-1} dx - \bar{\xi}^k \int_{|\xi|}^1 (1-x)^\alpha x^{-k-1} dx \right\} z^k.$$

В частном случае $\alpha = 0$ эти произведения совпадают с произведением Бляшке (см. [1], с. 625):

$$B(z; \{a_n\}) \equiv B_0(z; \{a_n\}) = \prod_n \frac{a_n - z}{1 - \bar{a}_n z} \cdot \frac{|a_n|}{a_n}.$$

Оператор интегро-дифференцирования $D^{-\alpha} (-1 < \alpha < +\infty)$ в смысле Римана – Лиувилля с началом в нулевой точке определяется следующим образом:

$$D^{-\alpha} \{ \varphi(r) \} = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^r (r-t)^{\alpha-1} \varphi(t) dt, & \text{если } 0 < \alpha < +\infty, \\ \varphi(r), & \text{если } \alpha = 0, \\ \frac{d}{dr} D^{-(1+\alpha)} \{ \varphi(r) \}, & \text{если } -1 < \alpha < 0. \end{cases}$$

В [2] доказано утверждение о взаимосвязи между произведениями B_α ($-1 < \alpha < 0$) и B .

Теорема. Пусть $-1 < \alpha < 0$ и последовательность $\{a_n\} \subset \mathbb{D}$ удовлетворяет условию (1). Тогда

$$B_\alpha(z; \{a_n\}) = B(z; \{a_n\}) \exp \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S_\alpha(e^{-i\theta} z) d\omega(\theta) \right\}, \quad |z| < 1,$$

где
$$S_\alpha(z) = \Gamma(1+\alpha) \left[\frac{2}{(1-z)^{1+\alpha}} - 1 \right],$$

$\omega(\theta)$ – невозрастающая функция ограниченной вариации на $[0; 2\pi]$, имеющая вид

$$\omega(\theta) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\theta D^{-\alpha} \left\{ \log \left| \frac{B_\alpha(r_n e^{i\theta}; \{a_n\})}{B(r_n e^{i\theta}; \{a_n\})} \right| \right\} d\theta,$$

$$(0 < r_1 < r_2 < \dots < r_n < \dots, r_n \uparrow 1).$$

Как хорошо известно (см. [3], с. 54). для существования радиального предела произведения Бляшке в граничной точке $e^{i\varphi}$ необходимо и достаточно, чтобы в этой точке выполнялось условие Фростмана

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - |a_n|}{|e^{i\varphi} - a_n|} < +\infty,$$

где $\{a_n\}$ – последовательность нулей этого произведения.

Для произведений B_α ($-1 < \alpha < 0$) доказано (см. [4]), что если в граничной точке $e^{i\varphi}$ имеет место условие типа Фростмана

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1 - |a_n|}{|e^{i\varphi} - a_n|} \right)^{1+\alpha} < +\infty,$$

то в этой точке существует конечный и отличный от нуля радиальный предел произведения B_α .

Говорят, что функция $f \in L^p(\partial\mathbb{D})$ входит в класс

$$Lip(\beta; p) (0 < \beta \leq 1, 1 \leq p < +\infty),$$

если ее L^p -модуль непрерывности

$$\omega_p(\delta) = \sup_{|\theta| \leq \delta} \left\{ \int_0^{2\pi} \left| f(e^{i(\varphi+\theta)}) - f(e^{i\varphi}) \right|^p d\varphi \right\}^{1/p}$$

удовлетворяет условию $\omega_p(\delta) \leq \text{const} \delta^\beta$. Согласно теореме Харди – Литтлвуда (см. [5], с. 78) граничные значения функции f из пространства Харди H^p принадлежат классу $Lip(\beta; p)$ тогда и только тогда, когда

$$\left\{ \int_0^{2\pi} \left| f'(re^{i\varphi}) \right|^p d\varphi \right\}^{1/p} \leq \frac{\text{const}}{(1-r)^{1-\beta}}.$$

Отметим, что при $\frac{1}{p} < \beta < 1$ имеем $Lip(\beta; p) \subset C(\partial D)$ (см. [5], с. 91).

Скажем, что последовательность $\{a_n\} \subset D$ удовлетворяет условию Ньюмана (N) , если

$$\sup_{n \geq 1} \frac{1 - |a_{n+1}|}{1 - |a_n|} < 1, (|a_n| \uparrow 1).$$

Скажем, что последовательность $\{a_n\} \subset D$ удовлетворяет условию (wN) , если состоит из конечного объединения (N) -последовательностей.

И. Э. Вербицким в [6] доказан следующий результат.

Теорема. Пусть B – произведение Бляшке, $\{a_n\}_{n \geq 1}$ – его нули. Следующие утверждения равносильны:

1. последовательность $\{a_n\}_{n \geq 1}$ удовлетворяет условию (wN) ;
2. $\hat{B}(k) = O\left(\frac{1}{k}\right)$;
3. $\sum_{k=N}^{\infty} |\hat{B}(k)|^2 = O(N^{-1})$;
4. $B \in Lip\left(\frac{1}{p}; p\right)$ для некоторого $p \in (1, \infty)$;
5. выполняется условие

$$\int_{\partial D} |B''(r\xi)| |d\xi| \leq C(1-r)^{-1}.$$

Целью настоящей работы является установление аналогичного результата для произведений B_α М. М. Джрбашяна.

Основные результаты. Сначала доказываются следующие утверждения.

Теорема 1. Граничная функция сходящего произведения B_α ($-1 < \alpha \leq 0$) не может принадлежать классу $Lip(1; 1)$.

Теорема 2. Пусть $-1 < \alpha \leq 0$, последовательность $\{a_n\} \subset D$ удовлет-

воряет условию (1) и $B_\alpha(e^{i\varphi}; \{a_n\}) \in \text{Lip}(\beta; p)$, $1 < p < +\infty$. Тогда $0 < \beta \leq \frac{1}{p}$.

Далее доказывается аналог упомянутой выше теоремы И. Э. Вербицкого.

Теорема 3. Пусть $-1 < \alpha \leq 0$ и $B_\alpha(z; \{a_n\})$ – сходящее произведение Джрбашяна. Тогда следующие условия равносильны:

1. последовательность $\{a_n\} \subset \mathbb{D}$ удовлетворяет условию (wN) ;
2. $\hat{B}_\alpha(k) = O\left(\frac{1}{k}\right)$;
3. $\sum_{k \geq m} |\hat{B}_\alpha(k)|^2 = O\left(\frac{1}{m}\right)$;
4. $B_\alpha(e^{i\varphi}; \{a_n\}) \in \text{Lip}\left(\frac{1}{p}; p\right)$ для некоторого $p \in (1, +\infty)$;
5. $\int_0^{2\pi} |B_\alpha''(re^{i\varphi})| d\varphi \leq \text{const}(1-r)^{-1}$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта N-18T-1AO19.

Армянский национальный политехнический университет
e.mail: dallakyan57@mail.ru

Р. В. Даллакян

Аналог одной теоремы Вербицкого для произведений Джрбашяна

М. М. Джрбашян, пользуясь оператором интегро-дифференцирования Римана – Лиувилля, обобщил класс мероморфных в единичном круге функций N Неванлинны, введя классы N_α ($-1 < \alpha < +\infty$). «Роль» произведений Бляшке в этих классах играют произведения B_α Джрбашяна. В статье доказан аналог одной теоремы И. Э. Вербицкого для произведений Джрбашяна B_α ($-1 < \alpha < 0$).

Ռ. Վ. Դալլաքյան

Վերբիցկու մի թեորեմի անալոգը Զրբաշյանի արտադրյալների համար

Մ. Մ. Զրբաշյանը, օգտվելով Ռիման-Լիուվիլլի ինտեգրո-դիֆերենցման տեսությունից, ընդհանրացրել է Նևանլինայի միավոր շրջանում մերոմորֆ N դասերը՝

ներմուծելով $N_\alpha (-1 < \alpha < +\infty)$ դասեր: Այդ դասերում Բլաշկեի արտադրյալի «դերը» կատարում են B_α Ջրբաշյանի արտադրյալները: Այս աշխատանքում ապացուցված է Ի. Է. Վերբիցկու մի թեորեմի անալոգը Ջրբաշյանի $B_\alpha (-1 < \alpha < 0)$ արտադրյալների համար:

R. V. Dallakyan

On a Verbitsky's Type Theorem for M. M. Djrbashyan Products

M. M. Djrbashyan had generalized the Nevanlinna's functional class N , and using Riemann – Liouville integro-differentiation operator introduced $N_\alpha (-1 < \alpha < +\infty)$ classes. In these classes Blaske products are substituted by Djrbashyan products. One analog of Werbitsky's theorem for Djrbashyan products $B_\alpha (-1 < \alpha < 0)$ is obtained in this paper.

Литература

1. *Джрбашян М. М.* Интегральные произведения и представления функций в комплексной области. М. Наука. 1966. 671 с.
2. *Джрбашян М. М., Захарян В. С.* – Мат. заметки. 1968. Т. 4. Вып. 1. С. 3-10.
3. *Коллингвуд Э., Ловатер А.* – Теория предельных множеств. М. Мир. 1971. 312 с.
4. *Захарян В. С.* – Изв. АН АрмССР. Математика. 1968. Т. 3. № 4-5. С. 287-300.
5. *Duren P. L.* Theory of H^p spaces. N. Y. and London, Ac. Press. 1970. 260 p.
6. *Вербицкий И. Э.* – Зап. научн. семинаров ЛОМИ. 1982. Т. 107. С. 27-35.

МЕХАНИКА

УДК 539.3

М. В. Белубекян¹, С. В. Саркисян²

**Распространение волн в системе тонкий слой –
полупространство со смешанными граничными условиями**

(Представлено чл.-кор. НАН РА А. С. Аветисяном 24/VI 2019)

Ключевые слова: *слой – полупространство, смешанные граничные условия, активное и реактивное акустическое сопротивление.*

Введение. В математическом моделировании физических явлений важнейшую роль играет выбор граничных условий. При изучении процесса распространения волн в упругих твердых телах принимается одно из предположений: границы тела жестко закреплены или границы тела свободны. Однако на практике существует множество ситуаций, когда нельзя пренебречь реальными свойствами сред, окружающих тело. Условию свободных лицевых поверхностей соответствует равенство нулю напряжений на границе; условиям закрепленных лицевых поверхностей – равенство нулю перемещений на границе. Оба эти граничные условия являются в большинстве случаев очень хорошим приближением, но иногда необходимо принимать в расчет более общее взаимодействие на границах сред. Обобщая, можно ввести условия упруго закрепленных границ, где в одном случае получаем свободные границы, а в другом – жестко закрепленные [1-4]. В [6-8] исследовано распространение волн в упругих телах с импедансными граничными условиями (на границе полупространства нормальное и касательное напряжения линейно изменяются с соответствующей составляющей перемещения, умноженной на частоту). Коэффициент, который связывает напряжения с соответствующей составляющей перемещения, принимает только реальные значения. Отметим, что кроме коэффициента там присутствует и частота колебания. В общем случае импеданс выражается как [9]: $Z = Z_1 + iZ_2$, где i – мнимая единица. Действительная часть, так называемое активное акустическое сопротивление, определяется диссипацией энергии в самой акустической системе и потерями на излучение звука. Мнимая часть, так называемое реактивное акустическое сопротивление, является следствием наличия в акустической системе сил

упругости или инерции масс. Поэтому реактивное сопротивление бывает упругим или инерционным. Наличие частоты говорит о том, что граничное условие должно быть комплексным выражением, и поэтому в настоящей статье предлагается модель для исследования распространения волн в упругих телах (полупространство с тонким слоем), где на внешней границе слоя касательное напряжение линейно меняется с соответствующей составляющей скорости.

1. Постановка задачи. Рассматриваются чисто сдвиговые упругие волны в системе слой – полупространство. Полупространство из упругого материала в прямоугольной системе координат (x, y, z) занимает область $x, z \in (-\infty, \infty), y \in [0, \infty)$, а слой – область $x, z \in (-\infty, \infty), y \in [-h, 0]$. Величины, относящиеся к слою, будут отмечаться индексом 1, соответствующие величины для полупространства будут без индексов.

Уравнение чисто сдвиговых волн в слое имеет вид [5]

$$\frac{\partial \sigma_{13}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{23}^{(1)}}{\partial y} = \rho_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2}, \quad (1.1)$$

где

$$\sigma_{13}^{(1)} = \mu_1 \frac{\partial w_1}{\partial x}, \sigma_{23}^{(1)} = \mu_1 \frac{\partial w_1}{\partial y}. \quad (1.2)$$

Соответствующее уравнение и материальные связи для полупространства следующие:

$$\frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (1.3)$$

$$\sigma_{13} = \mu \frac{\partial w}{\partial x}, \sigma_{23} = \mu \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (1.4)$$

Предполагается, что на внешней границе слоя задано условие

$$\sigma_{23}^1 + \alpha_0 \frac{\partial w_1}{\partial t} = 0 \quad \text{при } y = -h. \quad (1.5)$$

На плоскости контакта слоя и полупространства принимается непрерывность перемещения и напряжения

$$w_1 = w, \quad \sigma_{23}^{(1)} = \sigma_{23}, \quad \text{при } y = 0. \quad (1.6)$$

Требуется найти решения уравнений (1.1), (1.3), удовлетворяющие граничным условиям (1.5), (1.6) и условию затухания

$$\lim_{y \rightarrow \infty} w = 0. \quad (1.7)$$

2. Решение краевой задачи с граничным условием (1.5). Решение волнового уравнения (1.3) с учетом (1.4) представляется в виде [5]

$$w = A e^{kpy} \exp i(\omega t - kx), \quad (2.1)$$

где

$$p^2 - (1 - \eta^2) = 0 \quad \eta = \frac{\omega}{kc_t} c_t^2 = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2.2)$$

Для того чтобы решение (2.1) удовлетворяло условию затухания (1.7), необходимо, чтобы имело место неравенство

$$\operatorname{Re} p < 0. \quad (2.3)$$

В случае волн Лява ($\alpha_0 = 0$) получается $\eta^2 < 1$ и $p = -\sqrt{1 - \eta^2}$, т.е. для p получается действительное значение.

Если принять комплексные выражения

$$\omega = \alpha_1 + i\beta_1, \quad p = r + iq, \quad (2.4)$$

то условию затухания будет удовлетворять корень уравнения (2.2)

$$p_1 = -\Gamma + i\alpha\beta/\Gamma. \quad (2.5)$$

В (2.5) приняты новые обозначения:

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{kc_t}, \quad \beta = \frac{\beta_1}{kc_t},$$

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 - \alpha^2 + \beta^2 + \sqrt{(1 - \alpha^2 + \beta^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2} \right]^{1/2}. \quad (2.6)$$

При этом решение (2.1) при $p = p_1$ из (2.5) будет удовлетворять условию затухания, если

$$0 < \alpha^2 < 1 + \beta^2. \quad (2.7)$$

Примем, что слой достаточно тонок по сравнению с длиной волны. Запишем уравнение (1.1) в виде

$$\mu_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} + \frac{\partial \sigma_{23}^{(1)}}{\partial y} = \rho_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2}. \quad (2.8)$$

Для уравнения (2.8) примем, что $w_1 = w_1(x, t)$, и после этого проинтегрируем его по y от $-h$ до 0 ; с учетом граничных условий (1.5) и (1.6) получим

$$h\mu_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial w}{\partial y} + \alpha_0 \frac{\partial w}{\partial t} - \rho_1 h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad \text{при } y = 0. \quad (2.9)$$

Таким образом, для определения постоянного A решения (2.1) получили граничное условие (2.9).

3. Дисперсионное уравнение и численные результаты. Из (2.1) и (2.9) при значении корня $p = p_1$ из (2.5) получим дисперсионное уравнение, которое после разделения на действительную и мнимую части преобразуется к системе алгебраических уравнений относительно искомых безразмерных параметров α, β

$$\begin{aligned}\frac{H}{\Gamma}(1-\theta(\alpha^2-\beta^2))+\beta\alpha_*+\Gamma &= 0, \\ \delta\alpha\beta+\delta\alpha\alpha_*\Gamma+2\alpha\beta\Gamma &= 0.\end{aligned}\quad (3.1)$$

В (3.1) введены обозначения

$$c_{t1}^2 = \frac{\mu_1}{\rho_1}, \quad \theta = \frac{c_t^2}{c_{t1}^2}, \quad kh = H, \quad \alpha_* = \frac{\alpha_0 c_t}{\mu}, \quad \gamma = \frac{\mu}{\mu_1}, \quad \delta = \frac{\rho}{\rho_1}.$$

Из (3.1), когда частота ω действительная, следует $\beta = 0$, и решение, удовлетворяющее условию затухания (1.7), существует, если $\theta > 1$.

При подстановке решения (2.1) в граничное условие (2.9) получается дисперсионное уравнение для полупространства с тонким слоем с граничным условием (1.5)

$$H(\eta^2\theta-1)+i\gamma\eta\alpha_*-\gamma\sqrt{1-\eta^2}=0. \quad (3.2)$$

Если $\alpha_* = 0$, то из (3.2) получается дисперсионное уравнение задачи Лява для полупространства с тонким слоем, которое имеет действительное решение, удовлетворяющее условию затухания (1.7) при $\theta > 1$. Уравнение (3.2) запишем в виде

$$\sqrt{1-\eta} = \frac{1}{\sqrt{1+\eta}}(\gamma^{-1}H(\eta^2\theta-1)+i\alpha_*\eta). \quad (3.3)$$

Запись (3.3) удобна для нахождения корня уравнения (3.2) методом последовательных приближений:

$$\eta_n = 1 - \frac{1}{1+\eta_{n-1}}(\gamma^{-1}H(\eta_{n-1}^2\theta-1)+i\alpha_*\eta_{n-1}). \quad (3.4)$$

α_* γ	1	1.5
0.01	0.9574-0.0042i	0.9688-0.0044i
0.05	0.9572-0.0208i	0.9686-0.0219i
0.1	0.9565-0.0417i	0.9678-0.0439i
0.5	0.9345-0.2083i	0.9437-0.2193i

Численные решения уравнения (3.2) при значениях параметров $\theta = 2$, $H = 0.1$, $\gamma = 1$ и $\gamma = 1.5$ в зависимости от α_* , которое характеризует линейное изменение касательного напряжения от соответствующей составляющей скорости, приведены в таблице.

Таким образом, наличие на внешней границе слоя условия (1.5) (полупространство с тонким слоем) приводит к незначительному усилению затухания по глубине.

4. Решение краевой задачи с импедансными граничными условиями. Теперь рассмотрим задачу Лява с импедансными граничными условиями (на границе полупространства нормальное и касательное напряжения линейно изменяются с соответствующей составляющей перемещения, умноженной на частоту) [6-8]. Граничное условие (1.5) заменяется на

$$\sigma_{23}^1 + \omega Z w_1 = 0 \quad \text{при } y = -h. \quad (4.1)$$

Здесь ω – частота ($\omega \in R$), $Z \in R$ ($Z = \text{const}$). Условие (4.1) соответствует следующей модели: упругий слой покрыт бесконечно тонкой мембраной, допускающей свободные нормальные перемещения на границе и препятствующей касательным перемещениям. Отметим, что при $Z = 0$ из (4.1) имеем слой со свободной от напряжений границей, а при $Z \mapsto \infty$ – слой с закрепленной границей.

Удовлетворяя решениям (2.1) и (2.8) и граничным условиям (1.6) и (4.1), получим дисперсионное уравнение

$$\operatorname{tg}\left(kh\sqrt{\theta\eta^2-1}\right) = \frac{\gamma - \frac{\omega Z}{\mu_1 k \sqrt{1-\eta^2}}}{\sqrt{\frac{\theta\eta^2-1}{1-\eta^2}} + \frac{\gamma\omega Z}{\mu_1 k \sqrt{\theta\eta^2-1}}}. \quad (4.2)$$

Из (4.2) при $Z = 0$ получается дисперсионное уравнение задачи Лява [5].

Для полупространства с тонким слоем дисперсионное уравнение запишется в виде

$$\frac{\gamma}{H} \sqrt{1-\eta^2} = (\theta\eta^2-1) + \frac{Zc_t}{\mu_1 H} \eta. \quad (4.3)$$

При $Z = 0$ уравнение (4.3) имеет действительное решение $\frac{1}{\theta} < \eta^2 < 1$, удовлетворяющее условию затухания (1.7), если $\theta > 1$. Уравнение (4.3) при $Z \in R$ не имеет действительного решения. Следовательно, для полупространства с тонким слоем с импедансными граничными условиями (4.1) сдвиговые упругие волны не существуют.

Закключение. Таким образом, показано, что для полупространства с тонким слоем с импедансными граничными условиями сдвиговые упругие волны не существуют, в то время как в рассмотренной структуре (полупространство с тонким слоем), где на внешней границе слоя касательное напряжение линейно изменяется с соответствующей составляющей скорости, сдвиговые упругие волны существуют. На основе исследования упро-

ценных уравнений проанализирован волновой процесс в рассмотренной структуре.

¹Институт механики НАН РА

²Ереванский государственный университет

e.mail: vas@ysu.am

М. В. Белубекян, С. В. Саркисян

**Распространение волн в системе тонкий слой – полупространство
со смешанными граничными условиями**

Предлагается модель для исследования распространения волн в упругих телах (полупространство с тонким слоем), где на внешней границе слоя касательное напряжение линейно меняется с соответствующей составляющей скорости.

Մ. Վ. Բելուբեկյան, Ս. Վ. Սարգսյան

**Ալիքների տարածումը բարակ շերտ - կիսատարածություն համակարգում
խառը եզրային պայմաններով**

Առաջարկված է մի մոդել, որի միջոցով կարելի է հետազոտել ալիքների տարածումը առաձգական մարմիններում (բարակ շերտով կիսատարածություն), երբ շերտի արտաքին եզրին շոշափող լարումը փոփոխվում է գծայնորեն՝ արագության բաղադրիչին համապատասխան:

M. V. Belubekyan, S. V. Sarkisyan

**Propagation of Waves in a Thin Layer – Half-Space System
with Mixed Boundary Conditions**

The model is offered for the study of wave propagation in elastic bodies (half-space with a thin layer), where the shear stress on the outer boundary of the layer varies linearly with the corresponding component velocity.

Литература

1. *Kossovich L. Y., Mukhomodyarov R. R., Parfenova Y. A.* – Vestnik of Samara University. Natural Science Series. Mechanics. 2008. № 8/2 (67). P. 78-89 (in Russian).
2. *Meleshko V. V., Bondarenko A. A., Dovgiy S. A. et al.* – Mathematical methods and physico-mechanical fields. 2008. V. 51. № 2. P. 86-104 (in Russian).
3. *Belubekyan M. V.* – Proc. of NAS of Armenia. Mechanics. 2011. V. 64. № 4. P. 3-6 (in Russian).
4. *Belubekyan M. V., Sarkisyan S. V.* – Z Angew Math Mech. 2018. V. 98. P. 1623–1631. <https://doi.org/10.1002/zamm.201700157>.

5. *Belubekyan V. M., Sarkisyan S. V.* – Reports of NAS RA. 2018. V. 118. № 1. P. 33-38 (in Russian).
6. *Pham Chi Vinh, Trinh Thi Thanh Hue* – Int. J. Eng. Sci. 2014. V. 85. P. 175-185.
7. *Pham Chi Vinh, Nguyen Quynh Xuan* – European Journal of Mechanics-A/Solids. 2017. V. 61. P. 180-185.
8. *Baljeet Singh* – Geosciences Research. 2017. November, V. 2. № 4. <https://dx.doi.org/10.22606/gr.2017.24004>.
9. *Шутилов В. А.* Основы физики ультразвука: Учеб. пособие. Изд-во Ленингр. ун-та. 1980. 280 с.

МЕХАНИКА

УДК 539.3

Член-корреспондент НАН РА С. О. Саркисян

Дискретная и континуально-моментная модели графена для деформаций в своей плоскости

(Представлено 11/VII 2019)

Ключевые слова: *графен; деформация в своей плоскости; дискретно-континуальная, континуально-моментная теории; упругие постоянные.*

Введение. Бурное развитие нанотехнологий привело к открытию новых механических и физических свойств материалов, имеющих структурные элементы наноразмерного масштаба [1]. С этой точки зрения актуальность приобрела проблема математического моделирования таких материалов на микроскопическом масштабном уровне (построение дискретной или дискретно-континуальной модели) и далее построения соответствующей континуальной модели [1, 2].

Существование наноматериалов типа графена и углеродной нанотрубки привело к необходимости при построении дискретной модели учитывать моментное (независимое) и нецентральное силовое взаимодействие между атомами материала [3-5]. В [6, 7] исходя из таких предположений построены дискретно-моментная и континуально-микрополярная (одномерная, стержневая) модели для линейной цепочки атомов.

В [8-12] применительно к структурам масштаба нанометра принимается подход построения стержневой системы (дискретно-континуальной), эквивалентной атомной модели. В этих работах как стержневая модель выбрана классическая теория стержней без учета или с учетом изгибной деформации.

В данной статье этот подход развивается и для деформаций графена в своей плоскости (при построении дискретной модели). Как стержневая модель для стержневой системы, заменяющей атомную, выбрана континуально-микрополярная стержневая модель, построенная в [6, 7]. Осуществлен предельный переход от стержневой системы к континуальной модели плоского напряженного состояния графена и показано, что эта модель представляет собой модель плоского напряженного состояния моментной

(микрополярной) теории упругости (для изотропного случая) с независимыми полями перемещений и вращений [13, 14]. В итоге определены упругие постоянные, в том числе и моментные постоянные, через постоянные атомной структуры.

1. Постановка задачи. Предметом изучения является графен (двумерный материал), который представляет собой самое тонкое вещество (состоит из одного атомного слоя, рис. 1, а). Будем считать, что каждый атом взаимодействует лишь с ближайшими соседними атомами (рис. 1, б).

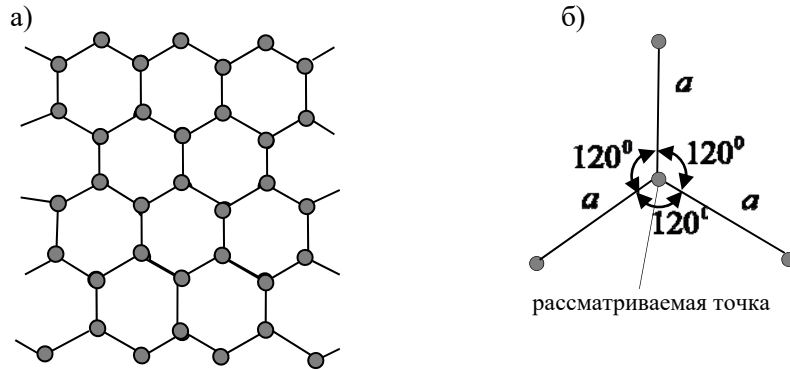


Рис. 1.

Предлагаемая в данной работе конкретная механическая модель упругой связи между атомами графена – модель упругого стержня, работающего на сжатие-растяжение, сдвиг и изгиб, построенная в работах [6, 7]. Потенциальная энергия деформации указанной модели упругого стержня имеет вид [6, 7]

$$U = \frac{1}{2} \int_0^a \left(\tilde{c}_1 \varepsilon_{\xi\xi}^2 + \tilde{c}_2 \gamma_{\xi\eta}^2 + \tilde{c}_3 \chi_{\xi\xi}^2 \right) d\xi, \quad (1.1)$$

где ξ – ось стержня, a – длина стержня (расстояние между атомами графена), $\varepsilon_{\xi\xi}$ – относительная деформация сжатия-растяжения вдоль оси ξ , $\gamma_{\xi\eta}$ – сдвиговая деформация в плоскости $\xi\eta$, $\chi_{\xi\xi}$ – кривизна оси стержня при изгибной деформации (в плоскости графена $\xi\eta$), $\tilde{c}_i (i=1,2,3)$ – упругие постоянные для соответствующих деформаций.

Кинетическая энергия рассматриваемого стержня выражается формулой [6, 7]

$$K = \frac{1}{2} \int_0^a \left[\tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_\xi}{\partial t} \right)^2 + \tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_\eta}{\partial t} \right)^2 + \tilde{I} \left(\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} \right)^2 \right] d\xi, \quad (1.2)$$

где $\tilde{\rho}$ – линейная плотность массы, $\tilde{I}$ – линейная плотность момента инерции, u_ξ – продольное перемещение, u_η – изгибное перемещение, Ω_z – угловой независимый поворот атома (ось z перпендикулярна к плоскости $\xi\eta$).

Для дальнейшего изучения задачи можно развивать два подхода:

а) дискретно-континуальный: в этом случае необходимо разрабатывать модель применения метода конечных элементов для одного стержня, затем для ячейки периодичности (рис. 1, б) и далее для всей рассматриваемой области графена с учетом соответствующих граничных условий;

б) континуальный: в этом случае необходимо исходя из задачи на ячейке предельным переходом построить континуальную модель для деформаций графена в своей плоскости и далее конкретные деформационные задачи графена изучать на основе решения соответствующих граничных задач этой континуальной модели.

Отметим, что основной целью данной работы являются, во-первых, построение континуальной модели для деформаций графена в своей плоскости и, во-вторых, сравнение этой модели с теорией плоской задачи моментной теории упругости и определение упругих постоянных этой теории через параметры атомной структуры графена. Развитию подхода а) будет посвящена отдельная статья.

2. Построение континуально-моментной модели для деформаций графена в своей плоскости. Потенциальная энергия деформаций и кинетическая энергия движения для ячейки периодичности (рис. 1, б) выражаются формулами

$$U = \sum_{k=1}^3 U_k, \quad K = \sum_{k=1}^3 K_k, \quad (2.1)$$

где U_k и K_k – потенциальная и кинематическая энергии k -го стержня ($k = 1, 2, 3$), которые определяются формулами (1.1), (1.2).

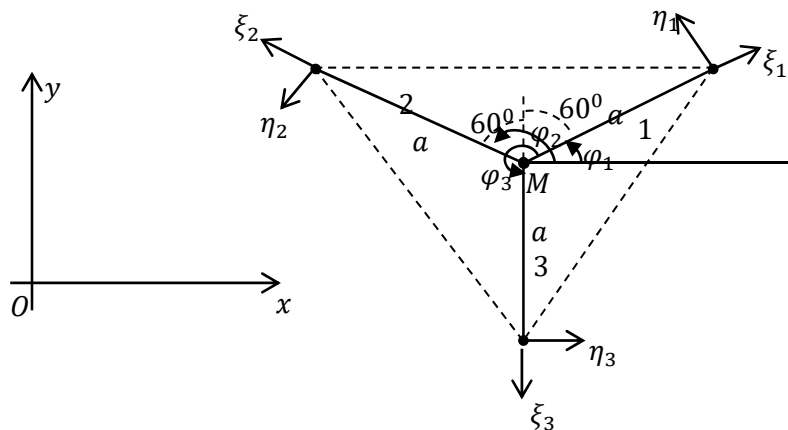


Рис. 2.

Приближенное значение поверхностной интенсивности энергии получим делением среднего значения суммарной энергии на площадь ячейки периодичности $S \left(S = \frac{3\sqrt{3}a^2}{4} \right)$. После предельного перехода ($a \rightarrow 0$) полу-

чим для соответствующей континуальной теории выражения интенсивностей потенциальной энергии деформации и кинетической энергии движения в данной точке плоскости графена. Если обозначить приближенное значение интенсивности потенциальной энергии деформации ячейки периодичности через $\bar{U}_0$, а приближенное значение интенсивности кинетической энергии ячейки периодичности – через $\bar{K}_0$, то для них будем иметь

$$\begin{aligned} \bar{U}_0 = \frac{2\sqrt{3}}{9a} & \left\{ \tilde{c}_1 e_{\xi_1 \xi_1}^2 + \tilde{c}_2 \gamma_{\xi_1 \eta_1}^2 + \tilde{c}_3 \chi_{\xi_1 \xi_1}^2 \right\}_{\left(\xi_1^*, 0 \right)}_{\left(x=x_1^*, y=y_1^* \right)} + \\ & + \left\{ \tilde{c}_1 e_{\xi_2 \xi_2}^2 + \tilde{c}_2 \gamma_{\xi_2 \eta_2}^2 + \tilde{c}_3 \chi_{\xi_2 \eta_2}^2 \right\}_{\left(\xi_2^*, 0 \right)}_{\left(x=x_2^*, y=y_2^* \right)} + \\ & + \left\{ \tilde{c}_1 e_{\xi_3 \xi_3}^2 + \tilde{c}_2 \gamma_{\xi_3 \eta_3}^2 + \tilde{c}_3 \chi_{\xi_3 \eta_3}^2 \right\}_{\left(\xi_3^*, 0 \right)}_{\left(x=x_3^*, y=y_3^* \right)}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_0 = \frac{2\sqrt{3}}{9a} & \left\{ \tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_{\xi}}{\partial t} \right)^2 + \tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_{\eta}}{\partial t} \right)^2 + \tilde{I} \left(\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} \right)^2 \right\}_{\left(\xi_1^{**}, 0 \right)}_{\left(x=x_1^{**}, y=y_1^{**} \right)} + \\ & + \left\{ \tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_{\xi}}{\partial t} \right)^2 + \tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_{\eta}}{\partial t} \right)^2 + \tilde{I} \left(\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} \right)^2 \right\}_{\left(\xi_2^{**}, 0 \right)}_{\left(x=x_2^{**}, y=y_2^{**} \right)} + \\ & + \left\{ \tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_{\xi}}{\partial t} \right)^2 + \tilde{\rho} \left(\frac{\partial u_{\eta}}{\partial t} \right)^2 + \tilde{I} \left(\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} \right)^2 \right\}_{\left(\xi_3^{**}, 0 \right)}_{\left(x=x_3^{**}, y=y_3^{**} \right)}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $(\xi_k^*, 0)$ или (x_k^*, y_k^*) , $(\xi_k^{**}, 0)$ или (x_k^{**}, y_k^{**}) ($k=1,2,3$) – точки на оси k -го стержня ячейки периодичности, диктуемыми теоремой о среднем значении соответствующих определенных интегралов.

Понятно, что при $a \rightarrow 0$ (x_k^*, y_k^*) , тогда $(x_k^{**}, y_k^{**}) \rightarrow (x, y)$ ($k=1,2,3$), где (x, y) – координаты точки M в системе координат (x, y) (рис. 2).

После предельного перехода для полученной континуальной модели необходимо $e_{\xi_k \xi_k}, \gamma_{\xi_k \eta_k}, \chi_{\xi_k \xi_k}$ ($k=1,2,3$) выражать через величины $e_{xx}, \gamma_{xy}, \chi_{xx}$ в координатной системе xy . В итоге

$$\begin{aligned} e_{\xi\xi} &= e_{xx} \cos^2 \varphi + e_{yy} \sin^2 \varphi + (\gamma_{xy} + \gamma_{yx}) \sin \varphi \cos \varphi, \\ \gamma_{\xi\eta} &= (-e_{xx} + e_{yy}) \sin \varphi \cos \varphi - \gamma_{yx} \sin^2 \varphi + \gamma_{xy} \cos^2 \varphi, \\ \chi_{\xi\xi} &= \chi_{xx} \cos \varphi + \chi_{yy} \sin \varphi, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где

$$\begin{aligned} e_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad e_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \Omega, \\ \gamma_{yx} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \Omega, \quad \chi_{xx} = \frac{\partial \Omega}{\partial x}, \quad \chi_{yy} = \frac{\partial \Omega}{\partial y}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Здесь следует добавить также следующие формулы:

$$\begin{aligned} u_{\xi} &= u_x \cos \varphi + u_y \sin \varphi, \\ u_{\eta} &= -u_x \sin \varphi + u_y \cos \varphi, \\ \Omega_z &= \Omega_z = \Omega. \end{aligned} \quad (2.6)$$

В формулах (2.4), (2.6) следует иметь в виду, что для первого стержня $\varphi = \varphi_1 = \frac{\pi}{6}$, для второго $\varphi = \varphi_2 = \frac{5\pi}{6}$, для третьего $\varphi = \varphi_3 = \frac{3\pi}{2}$.

Имея в виду ((2.4), (2.6), а также [6, 7]), что $\tilde{C}_k = aC_k$ ($k=1,2,3$), для плотностей потенциальной энергии деформации и кинетической энергии движения континуальной модели в единой системе координат xy получим

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{1}{2} \frac{4\sqrt{3}}{9} \left\{ \left(\frac{9}{8}c_1 + \frac{3}{8}c_2 \right) e_{xx}^2 + \left(\frac{9}{8}c_1 + \frac{3}{8}c_2 \right) e_{yy}^2 + \left(\frac{3}{4}c_1 - \frac{3}{4}c_2 \right) e_{xx}e_{yy} + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{3}{8}c_1 + \frac{9}{8}c_2 \right) \gamma_{yy}^2 + \left(\frac{3}{8}c_1 + \frac{9}{8}c_2 \right) \gamma_{yx}^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{3}{4}c_1 - \frac{3}{4}c_2 \right) \gamma_{xy}\gamma_{yx} + \frac{3}{2}c_3\chi_{xx}^2 + \frac{3}{2}c_3\chi_{yy}^2 \right\}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$K_0 = \frac{1}{2} \frac{4\sqrt{3}}{3} \left[\rho_0 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right)^2 + \rho_0 \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} \right)^2 + I_0 \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)^2 \right], \quad (2.8)$$

где ρ_0 – поверхностная плотность массы графена, I_0 – поверхностная плотность его момента инерции.

Принцип Гамильтона для построенной континуальной модели графена запишем в обычном виде

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \iint_{(S)} (U_0 - K_0) dx dy \right\} dt = 0, \quad (2.9)$$

где U_0 и K_0 определяются формулами (2.7) и (2.8).

Из принципа Гамильтона (2.9) следуют уравнения движения, выраженные через u_x, u_y и Ω , а также граничные условия.

3. Модель плоской задачи моментной теории упругости с независимыми полями перемещений и вращений как модель графена для деформаций в своей плоскости. Определение упругих постоянных моментной теории упругости через параметры атомной структуры графена. Рассмотрим принцип Гамильтона для плоского напряженного состояния моментной теории упругости с независимыми полями перемещений и вращений [14, 16]. Это вариационное уравнение можем записать в виде (2.9), где на этот раз имеем

$$\begin{aligned} \tilde{U}_0 = & \frac{1}{2} a \left[\frac{E}{1-\nu^2} e_{xx}^2 + \frac{E}{1-\nu^2} e_{yy}^2 + \frac{2E\nu}{1-\nu^2} e_{xx} e_{yy} + (\mu + \alpha) \gamma_{xy}^2 + (\mu + \alpha) \gamma_{yx}^2 \right. \\ & \left. + 2(\mu - \alpha) \gamma_{xy} \gamma_{yx} + B \chi_{xz}^2 + B \chi_{yz}^2 \right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\tilde{K}_0 = \frac{1}{2} \left[\rho_0 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right)^2 + \rho_0 \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} \right)^2 + I_0 \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)^2 \right]. \quad (3.2)$$

Здесь E, ν, μ, α, B — упругие коэффициенты указанной модели.

Сравнивая формулы (2.7) и (3.1), а также (2.8) и (3.2), получим следующие равенства:

$$\begin{aligned} \frac{4\sqrt{3}}{9a} \left(\frac{9}{8} C_1 + \frac{3}{8} C_2 \right) &= \frac{E}{1-\nu^2}, \quad \frac{4\sqrt{3}}{9a} \left(\frac{3}{4} C_1 - \frac{3}{4} C_2 \right) = \frac{2E\nu}{1-\nu^2}, \\ \frac{4\sqrt{3}}{9a} \left(\frac{3}{8} C_1 + \frac{9}{8} C_2 \right) &= \mu + \alpha, \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\frac{4\sqrt{3}}{9a} \left(\frac{3}{4} C_1 - \frac{3}{4} C_2 \right) = 2(\mu - \alpha), \quad \frac{4\sqrt{3}}{9a} \cdot \frac{3}{2} C_3 = B.$$

Решая систему уравнений (3.3) относительно E, ν, μ, α и B , получим

$$\begin{aligned} E &= \frac{4\sqrt{3}}{3a} \cdot \frac{C_1(C_1 + C_2)}{3C_1 + C_2}, \quad \mu = \frac{\sqrt{3}}{6a} \cdot (C_1 + C_2), \quad \alpha = \frac{\sqrt{3}}{3a} \cdot C_2, \\ \nu &= \frac{C_1 - C_2}{3C_1 + C_2}, \quad B = \frac{2\sqrt{3}}{3a} \cdot C_3. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Равенства (3.4) определяют упругие постоянные моментной теории упругости через постоянные атомной структуры графена.

Легко проверить, что на основе (3.4) имеет место известное равенство

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Таким образом, вариационное уравнение Гамильтона (2.10), когда потенциальная энергия деформации выражается формулой (3.1) (в которой упругие постоянные выражаются формулами (3.4)), а кинетическая энергия движения – формулой (3.2), представляет собой вариационное уравнение Гамильтона для континуальной теории деформаций графена в своей плоскости. Континуальная теория в свою очередь представляет плоское напряженное состояние моментной теории упругости с независимыми полями перемещений и вращений.

На основе указанного вариационного уравнения Гамильтона для континуальной теории можем получить уравнения движения в перемещениях и повороте, а также граничные условия.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта 18RF-106.

Ширакский государственный университет им М. Налбандяна
e.mail: s_sargsyan@yahoo.com

Член-корреспондент НАН РА С. О. Саркисян

Дискретная и континуально-моментная модели графена для деформаций в своей плоскости

Построена дискретно-континуальная модель (модель стержневой системы) графена для деформаций в своей плоскости. Предельным переходом построена континуальная модель для таких деформаций как модель плоского напряженного состояния моментной теории упругости с независимыми полями перемещений и вращений. Определены упругие постоянные моментной теории упругости через параметры атомной структуры графена.

ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Ս. Ն. Մարգարյան

Գրաֆենի՝ իր հարթության մեջ դեֆորմացիայի դիսկրետ և կոնտինուալ-մոմենտային մոդելները

Կառուցված է գրաֆենի՝ իր հարթության մեջ դեֆորմացիայի դիսկրետ-կոնտինուալ մոդելը (ձողային համակարգի մոդելը): Սահմանային անցումով կառուցվել է այդ դեֆորմացիայի կոնտինուալ մոդելը՝ որպես տեղափոխությունների և պտույտների անկախ դաշտերով առաձգականության մոմենտային տեսությամբ հարթ լարվածային վիճակի մոդել: Գրաֆենի ատոմային կառուցվածքի պարամետրերի միջոցով որոշված են մոմենտային առաձգականության տեսության առաձգական հաստատունները:

Corresponding member of NAS RA S. H. Sargsyan

**Discrete and Continual-Moment Models of Graphene
for Deformations in Its Plane**

In this paper a discrete-continual model (a model of beam system) of graphene for deformations in its own plane is constructed. Further, a continual model for this deformations is constructed as a model of a plane stress state of the moment theory of elasticity with independent fields of displacements and rotations. The elastic constants of the moment theory of elasticity are determined through the parameters of the atomic structure of graphene.

Литература

1. *Морозов Н. Ф.* – Механика твердого тела. 2005. № 4. С. 188-189.
2. *Гуткин М. Ю., Кривцов А. М., Морозов Н. Ф., Семенов Б. Н.* В сб.: Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород, посвященном 75-летию академика РАН Е. И. Шемякина. М. Наука. 2006. С. 221-242.
3. *Иванова Е. А., Кривцов А. М., Морозов Н. Ф., Фарсова А. Д.* – Доклады РАН. 2003. Т. 391. № 6. С. 764-768.
4. *Иванова Е. А., Кривцов А. М., Морозов Н. Ф.* – Прикладная математика и механика. 2007. Т. 71. Вып. 4. С. 595-615.
5. *Кривцов А. М.* Теоретическая механика. Упругие свойства одноатомных и двухатомных кристаллов. СПб. Изд-во Политехн. ун-та. 2009. 127 с.
6. *Саркисян С. О.* – Доклады НАН РА. 2019. Т. 119. № 1. С. 40-50.
7. *Саркисян С. О.* В кн.: Перспективные материалы и технологии: моногр. в 2-х томах. Т. 2. Витебск. УО «ВГТУ». 2019. С. 19-26.
8. *Odegard G. M., Gates T. S., Nicholson L. M., Wise K. E.* In: Technical Memorandum NASA/TM-2001-210863, NASA Langley Research Center, Langley, 2001.
9. *Гольдштейн Р. В., Ченцов А. В.* – Изв. РАН. Механика твердого тела. 2005. № 4. С. 57-74.
10. *Li C. A., Chou T. W.* – Int. J. Solids Struct. 2003. V. 40. P. 2487-2499.
11. *Беринский И. Е.* – Научно-техн. ведомости СПбГПУ. 2010. № 104. С. 13-20.
12. *Wan H., Delale F.* – Meccanica. 2010. V. 45. P. 43-51.
13. *Саркисян С. О.* – Прикладная математика и механика. 2008. Т. 72. Вып. 1. С. 129-147.
14. *Nowacki W.* Theory of Asymmetric Elasticity. Oxford. Pergamon. 1986. 383 p.
15. *Саркисян С. О.* – Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 5. С. 41-54.
16. *Sargsyan S. H.* – Internat. Journal of Mechanics. 2014. V. 8. P. 93-100.

ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ

УДК 539.3

А. М. Саргсян

Контактная задача о взаимодействии двух абсолютно жестких при растяжении и гибких при изгибе накладок с тонким круговым сектором. Часть II

(Представлено академиком Л. А. Агаловяном 24/VI 2019)

Ключевые слова: упругий сектор, абсолютно жесткие при растяжении и гибкие при изгибе накладки, особенность напряжений, коэффициенты при особенности

1. Введение. Изучение упругого равновесия конечных тел с угловыми точками на контуре имеет важное теоретическое и практическое значение и тесно связано с проблемой обеспечения необходимой прочности упругих тел. Упругое равновесие кругового сектора, когда на дуговой части контура заданы нормальные и касательные напряжения, а радиальные стороны усилены стрингерами, рассмотрено в [1]. Здесь рассматривается случай, когда на дуговой части контура заданы перемещения.

2. Постановка и решение задачи. Пусть радиальные стороны тонкого упругого кругового сектора усилены абсолютно жесткими при растяжении и гибкими при изгибе накладками, нагруженными растягивающими силами P_0 и P_α . На дуговой части контура заданы перемещения (рис.1).

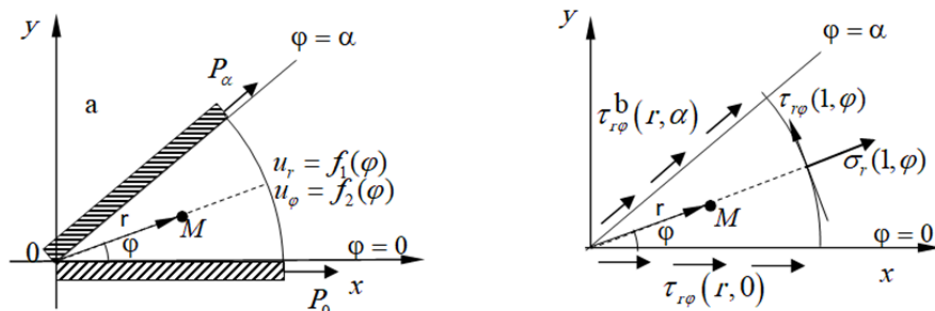


Рис. 1. Диаграмма усиления кругового сектора двумя накладками (а) и напряжения, возникающие на контуре сектора (b).

В полярной системе координат упругое состояние кругового сектора определяется решением бигармонического уравнения для функции напряжения Эри [2]

$$\Delta\Delta\Phi(r, \varphi) = 0 \quad (1)$$

при следующих граничных условиях на контуре сектора:

$$u_r(r, 0) = \sigma_\varphi(r, 0) = 0, \quad (2)$$

$$u_r(r, \alpha) = \sigma_\varphi(r, \alpha) = 0, \quad (3)$$

$$u_r(1, \varphi) = f_1(\varphi), \quad u_\varphi(1, \varphi) = f_2(\varphi), \quad (4)$$

где $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$ – функции из класса Дирихле [3], $f_1(0) = f_1(\alpha) = 0$.

Граничные условия (2) или (3) связаны с вопросами передачи нагрузок от тонкостенных элементов в виде стрингеров к упругим основаниям [4, 5]. Из условия равновесия накладок следует, что

$$\int_0^1 \tau_{r\varphi}(r, 0) dr = P_0, \quad \int_0^1 \tau_{r\varphi}(r, \alpha) dr = P_\alpha,$$

а из моментного условия равновесия сектора

$$\int_0^\alpha \tau_{r\varphi}(1, \varphi) d\varphi = 0.$$

Представляя решение бигармонического уравнения (1) в хорошо известном виде [2]

$$\Phi(r, \varphi) = r^{\lambda+1} [A \sin(\lambda+1)\varphi + B \cos(\lambda+1)\varphi + C \sin(\lambda-1)\varphi + D \cos(\lambda-1)\varphi],$$

для напряжения и перемещения будем иметь

$$\sigma_\varphi = \lambda \lambda^+ r^{\lambda-1} [A S_\varphi^+ + B C_\varphi^+ + C S_\varphi^- + D C_\varphi^-], \quad \tau_{r\varphi} = -\lambda r^{\lambda-1} [A \lambda^+ C_\varphi^+ - B \lambda^+ S_\varphi^+ + C \lambda^- C_\varphi^- - D \lambda^- C_\varphi^-],$$

$$\sigma_r = -r^{\lambda-1} [A \lambda \lambda^+ S_\varphi^+ + B \lambda \lambda^+ C_\varphi^+ + C(3-\lambda) \lambda S_\varphi^- + D(3-\lambda) \lambda C_\varphi^-], \quad (5)$$

$$Eu_r = r^\lambda [-A \lambda^+ \nu^+ S_\varphi^+ - B \lambda^+ \nu^+ C_\varphi^+ + C(4-\lambda^+ \nu^+) S_\varphi^- + D(4-\lambda^+ \nu^+) C_\varphi^-] + E(a \sin \varphi + b \cos \varphi),$$

$$Eu_\varphi = r^\lambda [-A \lambda^+ \nu^+ C_\varphi^+ + B \lambda^+ \nu^+ S_\varphi^+ - C(4+\lambda^- \nu^+) C_\varphi^- + D(4+\lambda^- \nu^+) S_\varphi^-] + E(-a \cos \varphi + b \sin \varphi + cr),$$

где A, B, C, D, λ – произвольные постоянные; a, b, c – постоянные, опре-

деляющие перемещения упругого тела как жесткого целого, $\lambda^\pm = \lambda \pm 1$,

$\nu^+ = 1 + \nu$, $S_\varphi^\pm = \sin(\lambda \pm 1)\varphi$, $C_\varphi^\pm = \cos(\lambda \pm 1)\varphi$. Как следует из (5), напря-

жения при $0 < \operatorname{Re} \lambda < 1$ будут обладать у вершины сектора сингулярностью порядка $1 - \operatorname{Re} \lambda$.

Удовлетворяя на радиальных сторонах сектора условиям (2) и (3), для определения произвольных постоянных A, B, C, D получим систему уравнений

$$\lambda \lambda^+ (B + D) = 0, \quad r^\lambda [-\lambda^+ \nu^+ B + (4 - \lambda^+ \nu^+) D] = -Eb, \quad \lambda \lambda^+ (A S_\alpha^+ + B C_\alpha^+ + C S_\alpha^- + D C_\alpha^-) = 0,$$

$$r^\lambda [-\lambda^+ \nu^+ S_\alpha^+ A - \lambda^+ \nu^+ C_\alpha^+ B + (4 - \lambda^+ \nu^+) (S_\alpha^- C + C_\alpha^- D)] = -E(a \sin \alpha + b \cos \alpha). \quad (6)$$

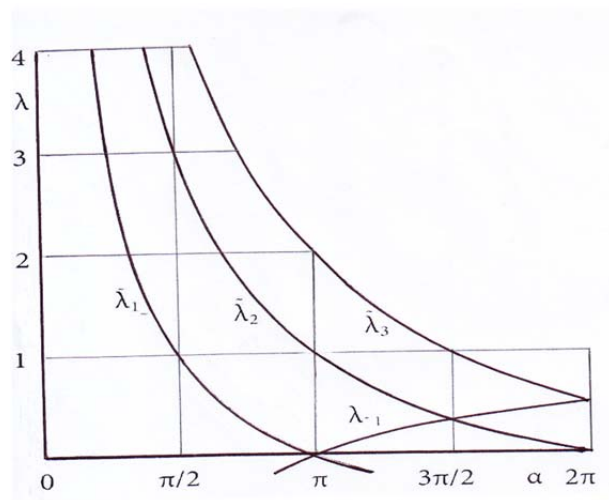


Рис. 2. График корней λ_k и $\tilde{\lambda}_n$, дающих бесконечные напряжения в угловой точке кругового сектора.

Если принять, что к вершине сектора не приложена сосредоточенная нагрузка, решение системы (6) даст $B=D=a=b=0$ и уравнение $\sin(\lambda+1)\alpha \cdot \sin(\lambda-1)\alpha = 0$, корни которого действительные и простые:

$$\lambda_k = \alpha_0 k + 1, \quad \tilde{\lambda}_n = \alpha_0 n - 1, \quad \alpha_0 = \pi/\alpha \quad (k, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (7)$$

На рис. 2 приведены графики корней λ_k и $\tilde{\lambda}_n$, дающие при определенных α бесконечные напряжения. Пересечения графиков λ_k и $\tilde{\lambda}_n$ с линией $\lambda=1$ определяют предельные углы раствора сектора, больше которых напряжения имеют особенность.

Требование конечности энергии упругой деформации в малой окрестности угловой точки сектора накладывает на корни (7) условия $\lambda_k > 0$, $\tilde{\lambda}_n > 0$, которые ограничивают область изменения параметров k и n , а именно:

- I) при $0 < \alpha < 2\pi$ имеем $k = 0, 1, 2, \dots$, $n = 2, 3, 4, \dots$,
- II) при $0 < \alpha < \pi$ имеем $k = 0, 1, 2, \dots$, $n = 1, 2, 3, \dots$,
- III) при $\pi < \alpha < 2\pi$ имеем $k = -1, 0, 1, \dots$, $n = 2, 3, 4, \dots$,
- IV) при $\alpha = 2\pi$ имеем $k = -1, 0, 1, \dots$, $n = 3, 4, 5, \dots$

С учетом того, что функции вида $\Phi_{kn}(r, \varphi) = C_k r^{\lambda_k+1} \sin(\lambda_k-1)\varphi + A_n r^{\tilde{\lambda}_n+1} \sin(\tilde{\lambda}_n+1)\varphi$ удовлетворяют уравнению (1) и граничным условиям

(2) и (3) на радиальных сторонах сектора, функции напряжения Эри для первых трех случаев принимают вид

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Phi_I \\ \Phi_{II} \\ \Phi_{III} \end{Bmatrix} &= C_{-1} \sin(\lambda_{-1} - 1)\varphi \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} r^{\lambda_{-1}+1} + C_1 \sin(\lambda_1 - 1)\varphi \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} r^{\lambda_1+1} + \\ &+ \begin{Bmatrix} a=2 \\ a=1 \\ a=2 \end{Bmatrix} \sum_{k=a}^{\infty} [C_k r^{\lambda_k+1} + A_k r^{\tilde{\lambda}_k+1}] \sin(\lambda_k - 1)\varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Случай IV) рассмотрим отдельно.

С помощью (5) и (8) напряжения и перемещения для случая III) примут вид

$$\begin{aligned} \text{III)} \quad \begin{Bmatrix} \sigma_\varphi \\ \tau_{r\varphi} \\ \sigma_r \end{Bmatrix} &= C_{-1} (1 - \alpha_0) \begin{Bmatrix} (2 - \alpha_0) \sin \alpha_0 \varphi \\ -\alpha_0 \cos \alpha_0 \varphi \\ (2 + \alpha_0) \sin \alpha_0 \varphi \end{Bmatrix} r^{-\alpha_0} + C_1 (1 + \alpha_0) \begin{Bmatrix} (2 + \alpha_0) \sin \alpha_0 \varphi \\ -\alpha_0 \cos \alpha_0 \varphi \\ (2 - \alpha_0) \sin \alpha_0 \varphi \end{Bmatrix} r^{\alpha_0} + \\ &+ \sum_{k=2}^{\infty} \left[C_k \lambda_k \begin{Bmatrix} (\lambda_k + 1) \\ (\lambda_k - 1) \\ (3 - \lambda_k) \end{Bmatrix} r^{\alpha_0 k} + A_k (\lambda_k - 1)(\lambda_k - 2) \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{Bmatrix} r^{\alpha_0 k - 2} \right] \begin{Bmatrix} \sin \alpha_0 k \varphi \\ -\cos \alpha_0 k \varphi \\ \sin \alpha_0 k \varphi \end{Bmatrix}, \quad (9) \\ E \begin{Bmatrix} u_r \\ u_\varphi \end{Bmatrix} &= -C_{-1} \begin{Bmatrix} (\lambda_1^+ \nu^+ - 4\nu) \sin \alpha_0 \varphi \\ -(\lambda_1^- \nu^+ - 4) \cos \alpha_0 \varphi \end{Bmatrix} r^{1-\alpha_0} - C_1 \begin{Bmatrix} (\lambda_1^+ \nu^+ - 4) \sin \alpha_0 \varphi \\ (\lambda_1^- \nu^+ + 4) \cos \alpha_0 \varphi \end{Bmatrix} r^{1+\alpha_0} - \\ &- \sum_{k=2}^{\infty} \left[\begin{Bmatrix} C_k (\lambda_k^+ \nu^+ - 4) r^{\lambda_k} + A_k \lambda_k^- \nu^+ r^{\tilde{\lambda}_k} \\ C_k (\lambda_k^- \nu^+ + 4) r^{\lambda_k} + A_k \lambda_k^- \nu^+ r^{\tilde{\lambda}_k} \end{Bmatrix} \right] \begin{Bmatrix} \sin \alpha_0 k \varphi \\ \cos \alpha_0 k \varphi \end{Bmatrix} + E \begin{Bmatrix} 0 \\ c \end{Bmatrix}. \end{aligned}$$

В первом случае отсутствуют первые слагаемые в правой части формулы (9), а во втором – первые и вторые слагаемые ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Неизвестные постоянные C_k и A_k определяются удовлетворением граничным условиям (4) на дуговой части контура. Для третьего случая получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \text{III)} \quad &-C_{-1} (\lambda_1^+ \nu^+ - 4\nu) \sin \alpha_0 \varphi - C_1 (\lambda_1^+ \nu^+ - 4) \sin \alpha_0 \varphi - \\ &- \sum_{k=2}^{\infty} [C_k (\lambda_k^+ \nu^+ - 4) + A_k \lambda_k^- \nu^+] \sin \alpha_0 k \varphi = E f_1(\varphi), \\ &-C_{-1} (\lambda_1^- \nu^+ - 4) \cos \alpha_0 \varphi - C_1 (\lambda_1^- \nu^+ + 4) \cos \alpha_0 \varphi - \\ &- \sum_{k=1}^{\infty} [C_k (\lambda_k^- \nu^+ + 4) + A_k \lambda_k^- \nu^+] \cos \alpha_0 k \varphi = E f_2(\varphi) - Ec. \end{aligned} \quad (10)$$

В случае I) отсутствуют первые слагаемые в левой части формулы (10), а в случае II) – первые и вторые слагаемые.

Для решения системы уравнения (10) поступим так же, как в работе [1]. В итоге для всех трех случаев получим

$$\begin{aligned} \text{I)} \quad C_1 &= -\frac{2}{\alpha} \frac{E \tilde{f}_{11}}{\lambda_1^+ v^+ - 4} = -\frac{2}{\alpha} \frac{E \tilde{f}_{21}}{\lambda_1^- v^+ + 4}, \\ C_k &= -\frac{E (\tilde{f}_{1k} - \tilde{f}_{2k}) \lambda_k^- v^+}{\alpha v^+ (v^+ - 4) \lambda_k^-}, \quad A_k = \frac{E \tilde{f}_{1k} (\lambda_k^- v^+ + 4) - \tilde{f}_{2k} (\lambda_k^+ v^+ - 4)}{\alpha v^+ (v^+ - 4) \lambda_k^-}, \\ \tilde{f}_{1k} &= \int_0^\alpha f_1(\varphi) \sin \alpha_0 k \varphi d\varphi, \quad \tilde{f}_{2k} = \int_0^\alpha f_2(\varphi) \cos \alpha_0 k \varphi d\varphi, \quad (k = 2, 3, 4, \dots). \end{aligned} \quad (11)$$

В данном случае между первыми коэффициентами Фурье функций $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$ имеет место соотношение

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{11} (\lambda_1^- v^+ + 4) - \tilde{f}_{21} (\lambda_1^+ v^+ - 4) &= 0, \\ \tilde{f}_{11} &= \int_0^\alpha f_1(\varphi) \sin \alpha_0 \varphi d\varphi, \quad \tilde{f}_{21} = \int_0^\alpha f_2(\varphi) \cos \alpha_0 \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (12)$$

II) C_k и A_k имеют вид (11), однако здесь $k = 1, 2, 3, \dots$

$$\text{III)} \quad C_{-1} = -\frac{E \tilde{f}_{11} (\lambda_1^- v^+ + 4) - \tilde{f}_{21} (\lambda_1^+ v^+ - 4)}{\alpha (\lambda_1^- v^+)^2 + 4(2 - v^+)}, \quad C_1 = -\frac{E \tilde{f}_{11} (\lambda_1^- v^+ + 4) + \tilde{f}_{21} (\lambda_1^+ v^+ - 4v)}{\alpha (\lambda_1^- v^+)^2 + 4(2 - v^+)},$$

а для C_k и A_k получаются те же формулы (11) ($k = 2, 3, 4, \dots$). Для всех трех случаев

$$c = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha f_2(\varphi) d\varphi. \quad (13)$$

Итак, решение краевой задачи (1) – (4) представлено в виде сходящихся рядов (9), коэффициенты которых определяются в явном виде.

Заметим, что ряды (9) и им подобные в случаях I) и II), определяющие напряжения и перемещения во внутренних точках и на контуре кругового сектора, сходятся в смысле сходимости обычных функциональных рядов и удовлетворяют граничным условиям на радиальных сторонах. Проверим выполнимость граничных условий (4) на дуговой части контура ($r = 1$), например, для второй задачи.

$$E \begin{Bmatrix} u_r(1, \varphi) \\ u_\varphi(1, \varphi) \end{Bmatrix} = -\frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} \tilde{f}_{1k} \sin \alpha_0 k \varphi \\ \tilde{f}_{2k} \cos \alpha_0 k \varphi \end{Bmatrix} + E \begin{Bmatrix} 0 \\ c \end{Bmatrix} = \frac{2}{\alpha} \int_0^\alpha \begin{Bmatrix} f_1(\gamma) \\ f_2(\gamma) \end{Bmatrix} \sum_{k=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} \sin \alpha_0 k \gamma \sin \alpha_0 k \varphi \\ \cos \alpha_0 k \gamma \cos \alpha_0 k \varphi \end{Bmatrix} d\gamma + E \begin{Bmatrix} 0 \\ c \end{Bmatrix}.$$

Последние ряды в смысле сходимости обобщенных функций [6, 7] сходятся к δ -функции Дирака. Действительно, разлагая δ -функцию Дирака в виде ряда по синусам и косинусам

$$\delta(\gamma - \varphi) = \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \sin \alpha_0 k \gamma \sin \alpha_0 k \varphi, \quad \delta(\gamma - \varphi) = \frac{1}{\alpha} + \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \cos \alpha_0 k \gamma \cos \alpha_0 k \varphi$$

и сопоставляя формулы для $u_r(1, \varphi)$, $u_\varphi(1, \varphi)$ с последними разложениями, имеем

$$u_r(1, \varphi) = f_1(\varphi), \quad u_\varphi(1, \varphi) = f_2(\varphi).$$

Т.е. решение задачи удовлетворяет всем условиям, заданным на контуре сектора.

Исследуем поведение напряжений вблизи вершины кругового сектора.

I) $0 < \alpha < 2\pi$, $k = 0, 1, 2, \dots$, $n = 2, 3, 4, \dots$ Как следует из (9), при $\alpha < \pi$ вблизи вершины кругового сектора имеет место малонапряженное состояние [8], т.е. напряжения стремятся к нулю. В случае $\alpha = \pi$ напряжения при $r \rightarrow 0$ конечны и вообще отличны от нуля. Если $\alpha > \pi$, то напряжения при $r \rightarrow 0$ имеют степенную особенность (стремятся к бесконечности), порядок которой меняется в пределах $0 < 2 - \alpha_0 k < 1$ при $k = 2$, $\pi < \alpha < 2\pi$; $0 < 2 - \alpha_0 k < 0.5$ при $k = 3$, $3\pi/2 < \alpha < 2\pi$.

Коэффициенты при особенности напряжений в общем случае отличны от нуля. Но когда $\alpha \rightarrow 2\pi$ ($k = 2$), хотя порядок особенности стремится к единице, эти коэффициенты из-за наличия в них множителя $(\lambda_2 - 2)$ стремятся к нулю. Этот результат существенно отличается от полученного в [1], где на дуговой части контура заданы внешние усилия. Там эти коэффициенты отличны от нуля.

II) $0 < \alpha < \pi$, $k = 0, 1, 2, \dots$, $n = 1, 2, 3, \dots$ Особенность напряжений возникает при $k = 1$, $\pi/2 < \alpha < \pi$, порядок ее меняется в пределах $0 < 2 - \alpha_0 < 1$, а общий множитель коэффициентов при особенности имеет вид $(\lambda_1 - 2)[\tilde{f}_{11}(\lambda_1^- \nu^+ + 4) - \tilde{f}_{21}(\lambda_1^+ \nu^+ - 4)]$, который в случае $\alpha \rightarrow \pi$ стремится к нулю, так как $(\lambda_1 - 2) \rightarrow 0$. При условии (12) окрестность вершины сектора находится в малонапряженном состоянии при $0 < \alpha < \pi$.

III) $\pi < \alpha < 2\pi$, $k = -1, 0, 1, \dots$, $n = 2, 3, 4, \dots$ Для любого значения α все три напряжения имеют степенную особенность того или иного порядка при $r \rightarrow 0$. Порядок особенности напряжений меняется в пределах

$$0.5 < \alpha_0 < 1, \quad \pi < \alpha < 2\pi, \quad 0 < 2 - \alpha_0 k < 1, \quad \pi < \alpha < 2\pi, \quad k = 2, \\ 0 < 2 - \alpha_0 k < 0.5, \quad 3\pi/2 < \alpha < 2\pi, \quad k = 3.$$

Рассмотрим подробнее поведение напряжений в окрестности вершины сектора при $\alpha \rightarrow \pi$ и $\alpha \rightarrow 2\pi$. Когда $\alpha \rightarrow \pi$, порядок особенности напряжений стремится к единице, а ее коэффициенты стремятся к нулю из-за наличия в них множителя $(\alpha_0 - 1)$. В случае $\alpha \rightarrow 2\pi$ порядок особен-

ности напряжений также стремится к единице, а соответствующие коэффициенты стремятся к нулю из-за наличия в них множителя $(\lambda_2 - 2)$. Для $k = 3$ имеем обычную степенную особенность, коэффициенты которой отличны от нуля.

Таким образом, при рассмотрении задач упругого равновесия кругового сектора, когда его радиальные стороны усилены стрингерами, а на дуговой части контура заданы напряжения или перемещения, выяснилось, что в случае первого из этих двух граничных условий коэффициенты при возникшей степенной особенности напряжений $r^{-1+\varepsilon}$ ($\varepsilon > 0$; $\varepsilon \rightarrow 0$ при $\alpha \rightarrow \pi$ или $\alpha \rightarrow 2\pi$) отличны от нуля, а во втором случае стремятся к нулю. И поэтому с точки зрения механики хрупкого разрушения первый тип нагружения дуговой части контура кругового сектора является наиболее опасным.

Отметим также, что уравнения статического равновесия кругового сектора во всех трех случаях I), II) и III) удовлетворяются тождественно.

Институт механики НАН РА
e.mail: azat-sargsyan@mail.ru

А. М. Саргсян

Контактная задача о взаимодействии двух абсолютно жестких при растяжении и гибких при изгибе накладок с тонким круговым сектором. Часть II

Методом разделения переменных построено решение плоской задачи теории упругости для тонкого кругового сектора, на дуговой части контура которого заданы перемещения, а радиальные стороны усилены стрингерами. Исследованы особенность напряжений вблизи вершины сектора и поведение коэффициентов при особенности напряжений. Установлено, что в окрестности вершины сектора, когда $\alpha \rightarrow \pi$ и $\alpha \rightarrow 2\pi$, напряжения имеют особенность вида $r^{-1+\varepsilon}$ ($\varepsilon > 0$; $\varepsilon \rightarrow 0$ при $\alpha \rightarrow \pi$ или $\alpha \rightarrow 2\pi$), коэффициенты которой в отличие от случая, когда на дуговой части контура заданы нормальные и касательные напряжения, стремятся к нулю. Поэтому с точки зрения предотвращения хрупкого разрушения принятые в данной работе граничные условия на дуговой части контура физически более приемлемы.

Ա. Մ. Սարգսյան

Բարակ շրջանային սեկտորի հետ երկու սեղման նկատմամբ բացարձակ կոշտ և ձգման նկատմամբ բացարձակ ճկուն վերդրակների փոխազդեցության կոնտակտային խնդրի մասին: Մաս II

Փոփոխականների անջատման մեթոդի օգնությամբ կառուցվել է բարակ շրջանային սեկտորի համար առաձգականության տեսության հարթ խնդրի լուծումը, երբ

սեկտորի եզրագծի աղեղային մասի վրա տրված են տեղափոխությունները, իսկ շառավղային կողմերը ուժեղացված են ստրինգերներով: Բացահայտված է, որ սեկտորի գագաթի շրջակայքում, երբ $\alpha \rightarrow \pi$ և $\alpha \rightarrow 2\pi$, լարումներն ունեն $r^{-1+\varepsilon}$ ($\varepsilon > 0$; $\varepsilon \rightarrow 0$ երբ $\alpha \rightarrow \pi$ կամ $\alpha \rightarrow 2\pi$) տեսքի եզակիություն, իսկ լարումների եզակիության գործակիցները, ի տարբերություն այն դեպքի, երբ եզրագծի աղեղային մասի վրա տրված են լարումների արժեքները, ձգտում են զրոյի: Հետևաբար՝ նյութի փխրուն քայքայումը կանխելու տեսակետից սեկտորի աղեղային մասում դրված եզրային պայմանները ֆիզիկապես ավելի ընդունելի են:

A. M. Sargsyan

Contact Problem on the Interaction of Two Straps Absolutely Rigid in Tension and Flexible in Bending with a Thin Circular Sector. Part II

By the method of variables separation a solution is constructed to the boundary-value problem of elasticity theory for the circular sector whose radial sides are reinforced by two straps absolutely rigid intension and flexible bending. On the arc part of its contour, displacements are given. The singularity of stresses in the vicinity of top of the circular sector and the behavior of coefficients of the stresses singularity are investigated. It is established that, when $\alpha \rightarrow \pi$ and $\alpha \rightarrow 2\pi$, the stresses have the singularity in the form of $r^{-1+\varepsilon}$ ($\varepsilon > 0$; $\varepsilon \rightarrow 0$ at $\alpha \rightarrow \pi$ or $\alpha \rightarrow 2\pi$), the coefficients of which, in like the case, when on the arc part of the contour normal and tangential stresses are given, tend to zero. That is why from the point of view of the brittle fracture prevention, the acceptance of the boundary conditions on the arc part sector contour in the given parer is physically more acceptable.

Литература

1. *Саргсян А. М.* – Механика композитных материалов. 2017. Т. 53. № 1. С. 143-154.
2. *Williams M. L.* – Appl. Mech. 1952. V.19. № 4. P. 526-528.
3. *Смирнов В. И.* Курс высшей математики. Т.2. М. Наука. 1974. 666 с.
4. *Melan E.* – Ing. Archiv. 1932. Bd.3. Haft 2. P.123.
5. *Александров В. М., Мхитарян С. М.* Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. М. Наука. 1983. 488 с.
6. *Гельфанд И. М и др.* Обобщенные функции, вып.1-3. М. Физматгиз. 1958.
7. *Тихонов А. Н., Самарский А. А.* Уравнения математической физики. М. Изд-во технико-теоретической литературы. 1953. 680 с.
8. *Чобанян К. С.* Напряжения в составных упругих телах. Ереван. Изд-во АН АрмССР. 1987. 338 с.

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 541.128: 661.719.3

С. Г. Минасян, Л. Н. Мхитарян, З. О. Манукян,
академик Л. А. Тавадян

Антипероксирадикальная активность витамина B12

(Представлено 12/VIII 2019)

Ключевые слова: витамин B12 (цианокобаламин), вольтамперометрия, ORAC, антипероксирадикальная активность, антирадикальная емкость.

Кобаламины играют важную роль в биохимических процессах в качестве кофактора аденозил- и метил-кобаламинзависимых ферментов, катализируют изомеризацию субстратов (например, метилмалонил и глутамат мутазы, диольдегидразы), катализируют реакции переноса водорода и метиловых групп (например, метил трансферазы и рибонуклеотидредуктазы). Кобаламины участвуют в биохимических процессах синтеза и регуляции ДНК, образовании эритроцитов, деятельности нервной и зрительной систем [1-4].

В научной литературе широко обсуждается взаимосвязь степени проявления окислительного стресса и содержания кобаламина в организме, основные функциональные роли кобаламина в процессе окислительного стресса: каталитическое промотирование синтеза антиоксидантов в организме, участие кобаламинов в процессе каталитической или стехиометрической утилизации ряда продуктов, образующихся в результате окислительного стресса [5-8].

Ряд публикаций посвящен общей антиоксидантной активности цианокобаламина (витамин B12, рис. 1) в организме, его способности защищать ДНК и липиды клеток от окислительных повреждений [2, 3, 5, 9]. Однако эти публикации в основном относятся к исследованиям непрямой, опосредованной антиоксидантной активности витамина B12, несмотря на то что именно цианокобаламин широко используется в лечебной и профилактической терапии. Поэтому исследования прямых реакций цианокобаламина с носителями цепной реакции пероксидного окисления липидов клеток пероксильными радикалами являются актуальной научной задачей. Особенно важны выявление антипероксирадикальных реакционных цент-

ров цианокобаламина и определение количественных характеристик антиоксидантной активности.

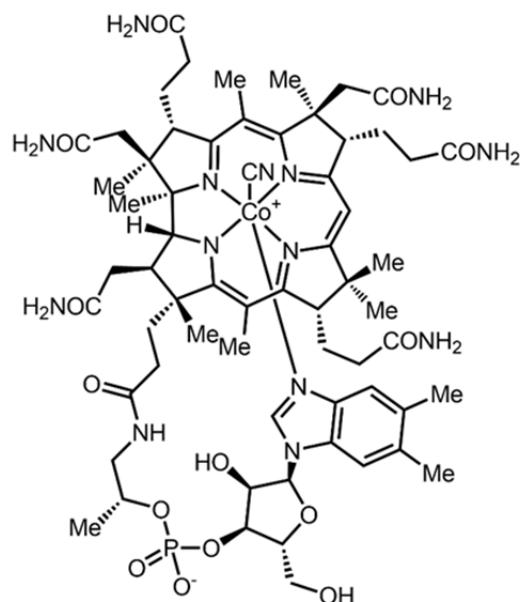


Рис. 1. Молекулярная структура витамина B12 (цианокобаламина).

Целью работы является изучение антипероксирадикальной активности цианокобаламина в водной среде при физиологических температуре и pH методами определения поглощающей емкости по отношению к кислородцентрированным радикалам (ORAC) и квадратично-волновой вольтамперометрии (SWV).

Реактивы. Цианокобаламин, 2,2'-азо-бис(2-амидинопропан) гидрохлорид (AAPH), 6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновая кислота (*Тролокс*), флуоресцеин (Fl)-3',6'-дигидроксиспиро[изобензофуран-1(3H),9'-[9H]ксантен]-3-она динатриевая соль, физиологический раствор (0.9%-й водный раствор хлорида натрия (NaCl)), фосфатный буфер (0.1M, pH=7.4) приобретены у химической компании Sigma-Aldrich (США). В экспериментах использовалась деионизированная вода с электрическим сопротивлением ≥ 16 МОм·см при 25°C (H₂Economy, LLC, RA).

Электрохимические измерения. Измерения методом SWV проводились на биоаналитической системе 100B/W (Bioanalytical Systems (BAS), США). Вольтамперограммы снимались с использованием трехэлектродной схемы, где в качестве рабочего электрода использовался стеклоуглеродный электрод (GC) сечением 0.09 см². Перед каждым определением GC электрод очищался в течение 3 мин посредством пудры из Al₂O₃, размером частиц 0.5 мкм. Электрод сравнения – насыщенный хлорсеребряный Ag/AgCl/KCl вспомогательный – платиновый электрод. Работа электрохимической аналитической системы проверялась с помощью эталонных

растворов $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$. В качестве фонового электролита использовался фосфатный буфер (0.1 М, pH=7.4). Концентрированный раствор цианокобаламина (4×10^{-4} М) готовился в физиологическом растворе.

SWV вольтамперограммы снимались в диапазоне потенциалов +1500 ÷ -1500 мВ (милливольт). Условия регистрации приведены в подписях к рис. 2.

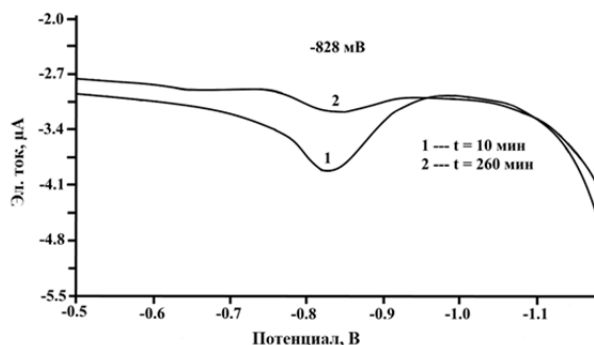


Рис. 2. Уменьшение величины тока при катодном потенциале -828 ± 20 мВ в SWV вольтамперограммах цианокобаламина в результате реакции с пероксильными радикалами. Концентрации $[\text{цианокобаламин}]_0 = 2.5 \times 10^{-5}$ М, $[\text{AAPH}]_0 = 2.5 \times 10^{-3}$ М (скорость зарождения радикалов $R_i = 3.4 \times 10^{-9} \text{ Мс}^{-1}$), $T = 37.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$. Растворитель – деионизированная вода, фосфатный буфер (0.1 М, pH=7.4). Условия регистрации SWV: скорость развертки напряжения – 20 мВ/с, частота – 25 Гц, SWV амплитуда – 25 мВ.

Изменения в реакционной системе цианокобаламина с пероксильными радикалами, генерируемые путем термического распада водорастворимого азосоединения – ААРН в насыщенном кислородом водном растворе, периодически регистрировались в течение 300 мин при температуре $37 \pm 0.2^\circ\text{C}$.

Метод определения поглощающей емкости по отношению к кислородцентрированными радикалам («Oxygen Radical Absorbtion Capacity», ORAC). Метод ORAC основан на измерении во времени интенсивности флуоресценции флуоресцеина, связывающего генерируемые кислородцентрированные радикалы [10-12]. Антиоксиданты, вводимые в реакционную среду, взаимодействуя с радикалами замедляют свободнорадикальное расходование FI.

Кинетика изменения интенсивности флуоресценции FI регистрировалась флуоресцентным спектрометром Perkin-Elmer с компьютерной регистрацией. Длина волн возбуждаемого и эмиссионного света была равна 485 и 510 нм, соответственно. В экспериментах учитывалось и корректировалось снижение флуоресценции флуоресцеина из-за поглощения цианокобаламина в диапазоне 480-510 нм. Антипероксирадикальная активность – антипероксирадикальная емкость f_{AO} цианокобаламина определя-

лась по площади между двумя кинетическими кривыми уменьшения интенсивности флуоресценции FI в отсутствие и в присутствии цианокобаламина и стандартного антиоксиданта – *Тролокса* по методике, приведенной в [10, 11]. Интегрирование соответствующих площадей осуществлялось по закону трапеции с помощью компьютерной вычислительной программы Microcal Origin 8.0.

Пероксильные (2-амидинопропил пероксильные) радикалы генерировались термическим распадом ААРН в насыщенном кислородом водном растворе при температуре 37 ± 0.1 °С.

Результаты. Как видно из SWV вольтамперограмм цианокобаламина, приведенных на рис. 2, характерный редокс потенциал цианокобаламина наблюдается при -828 ± 20 мВ. Этот потенциал восстановления относится к обратимому одноэлектронному переходу Co(II)/Co(I) [13-14] или двухэлектронному переходу Co(III)/Co(I) [15].

При генерации пероксильных радикалов в реакционном растворе в течение времени величина тока, соответствующая характерному редокс потенциалу цианокобаламина -828 ± 20 мВ уменьшается, как представлено на рис. 2. На рис. 3 приведена кинетика уменьшения величины силы тока в

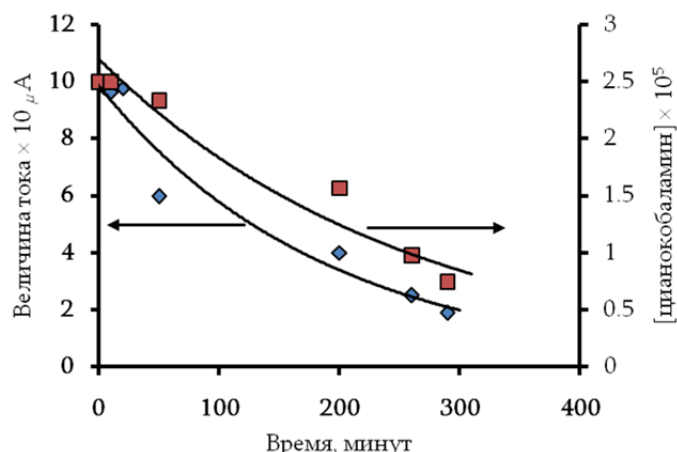


Рис. 3. Кинетика уменьшения величины тока при катодном потенциале -828 ± 20 мВ и соответственно концентрации цианокобаламина в результате реакции с пероксильными радикалами, полученные методом SWV. Условия эксперимента и регистрации SWV см. подпись к рисунку 2.

течение реакции. Это свидетельствует о том, что цианокобаламин прямо реагирует с пероксильными радикалами. При этом происходят необратимые структурные изменения в молекуле цианокобаламина, в ближайшей координационной сфере Co(III) . Так как центральный металлоэлемент Co находится в окисленном состоянии и не способен окисляться, можно сделать вывод, что с пероксильными радикалами реагируют относительно активные реакционные центры лиганда.

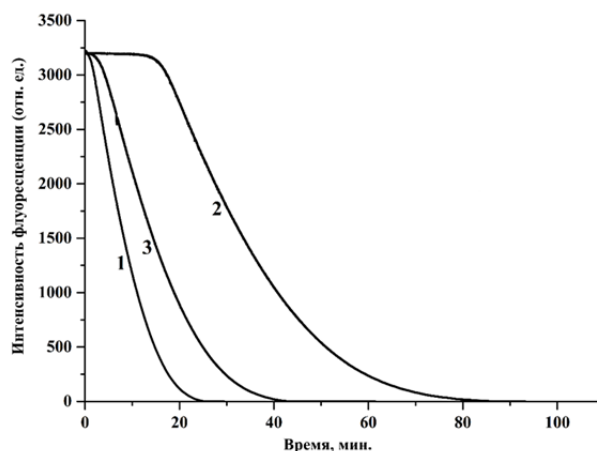


Рис. 4. Кинетические кривые уменьшения интенсивности флуоресценции F1 при 510 нм в результате реакции с пероксильными радикалами в отсутствие (1) и присутствии антиоксидантов: Тролокс (2), цианокобаламин (3) при температуре $37.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$. $[\text{AAPH}]_0 = 2 \times 10^{-2} \text{M}$ (скорость зарождения радикалов $R_i = 2.72 \times 10^{-8} \text{M s}^{-1}$), $[\text{Тролокс}]_0 = 10^{-5} \text{M}$, $[\text{цианокобаламин}]_0 = 10^{-5} \text{M}$. Растворитель – деионизированная вода, фосфатный буфер (0.1M, pH=7.4).

Как видно из результатов, полученных методом ORAC (рис. 4), цианокобаламин ингибирует свободнорадикальное расходование F1, т.е. проявляет себя как антиоксидант. Эти данные также свидетельствуют, что витамин B12 прямо реагирует с пероксильными радикалами. На основе экспериментальных данных в представленной работе впервые определено значение антипероксирадикальной емкости цианокобаламина. Величина f_{ac} равна 0.5 ± 0.05 . Это дает основание говорить о существенной антиоксидантной активности цианокобаламина, а также указывает на наличие прямой реакции пероксильных радикалов с цианокобаламином.

Обсуждение. При выявлении реакционного центра витамина B12, участвующие в окислении пероксильными радикалами, исходили из того, что эти реакции происходят при достаточно мягких условиях (практически при физиологических условиях). Это является ключевой характеристикой проявления антиоксидантных свойств витамина B12. Химический процесс окисления осуществляется пероксильными радикалами ($\text{ROO}^\bullet$), которые по реакционно-окислительной способности существенно уступают таким эссенциальным радикалам как гидроксильный ($\text{OH}^\bullet$) и алкоксильный ($\text{RO}^\bullet$) радикалы. Цианокобаламин является кобальтовым комплексом нуклеотида 5,6-диметилбензимидазола и макроциклической корриновой системы. Атом кобальта связан координационными связями с атомами азота трех пирролиновых циклов и ковалентной связью с четвертым атомом азота пирролидинового кольца (рис. 1). Центральный атом кобальта находится в степени окисления Co(III) и не подвержен дальнейшему окислению. Отдельные молекулярные составляющие витамина B12 трудноокисляемы: корриновый макроцикл, алкиламидные группы, пятиугле-

родный сахарид (рибоза), связанный с фосфатной группой (фосфорный эфир α -D-рибозы). Некоординированный 5,6-метилбензиимидазол в сравнительно мягких условиях также не окисляется. В более жестких условиях (бихроматом калия) окисляются 5,6-замещённые метильные группы бензольного кольца [16, 17]. Однако приведенные в настоящей работе экспериментальные данные однозначно указывают на то, что цианокобаламин реагирует с пероксильными радикалами, дезактивируя их, и замедляет окисление флуоресцеина пероксильными радикалами. Об антирадикальной активности цианокобаламина также свидетельствуют литературные данные, согласно которым цианокобаламин ингибирует цепные реакции окисления метиллинолеата и протеинов низкой плотности [18,19].

Для объяснения экспериментально наблюдаемых данных предполагается, что в процессах мягкого окисления участвует 5,6-бензиимидазольный нуклеотид, одним атомом азота аксиально-координированный с атомом кобальта, а другим атомом азота ковалентно связанный с сахаридом. Участие 5,6-диметилбензиимидазольного нуклеотида в реакции становится возможным именно из-за координации имидазольного азота с центральным металлоэлементом. Это приводит к активации атома водорода у атома углерода 2 имидазольного кольца и относительной стабилизации промежуточных структур при реакции отрыва атома водорода или присоединения кислородцентрированных радикалов к имидазольному кольцу. В итоге 5,6-диметилбензиимидазольный нуклеотид становится реакционно-активным по отношению к пероксильному радикалу. В результате реакции присоединения к двойной связи образуется промежуточный радикал с неспаренным электроном на атоме азота, который стабилизируется сопряжением с 5,6-диметилзамещённым бензольным кольцом и вследствие координации с центральным металлоэлементом комплекса Co(III). Далее азотцентрированный радикал реагирует со вторым пероксильным радикалом, как показано на схеме (рис.5).

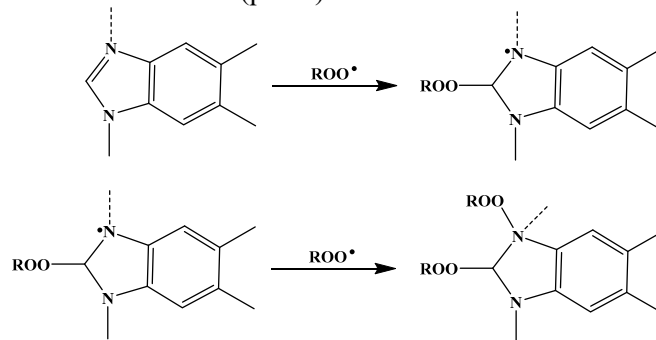


Рис. 5. Схема реакции пероксильных радикалов с 5,6-бензиимидазольным нуклеотидом цианокобаламина.

Явление активации реакционных центров лигандов наблюдалось и для других комплексов, у которых центральный металлоэлемент и свобод-

ный лиганд не активны по отношению к исследуемым свободным радикалам. Однако благодаря координации с центральным металлоэлементом потенциально реакционноактивные центры лиганда активируются. В итоге металлокомплекс приобретает антипероксирадикальную и антиоксидантную активность. Такой эффект наблюдается у замещённых салицилатных комплексов Cu(II), Fe(III) [20].

Выводы. На основе полученных экспериментальных данных установлено, что в водной среде при физиологических условиях витамин B12 не реагирует с пероксильными радикалами и способен ингибировать цепные окислительные процессы, включая реакции пероксидного окисления липидов, в которых носителем цепи являются пероксильные радикалы. Предложен возможный механизм химической реакции цианокобаламина с пероксильными радикалами.

Полученные в настоящей работе результаты являются важной информацией для выявления химических механизмов взаимодействия цианокобаламина с пероксильными радикалами, играющими одну из ключевых ролей в процессе окислительного стресса в организме, и для повышения эффективности лечебной терапии с использованием витамина B12.

Работа выполнена в рамках тематического финансирования ГКН РА (18T-1D318) 2018-2020 гг.

Институт химической физики им. А. Налбандяна НАН РА
e.mail: tavadyan@ichph.sci.am

**С. Г. Минасян, Л. Н. Мхитарян, З. О. Манукян,
академик Л. А. Тавадян**

Антипероксирадикальная активность витамина B12

Изучена антипероксирадикальная активность цианокобаламина (витамин B12) в водной среде при физиологических температуре и pH методами определения поглощающей емкости по отношению к кислородцентрированным радикалам (ORAC) и квадратично-волновой вольтамперометрии (SWV). Установлено, что в водной среде витамин B12 непосредственно реагирует с пероксильными радикалами. На основе кинетических данных, полученных методом ORAC, впервые определена антипероксирадикальная емкость цианокобаламина. Предложены механизм антипероксирадикальной активности и соответствующий реакционный центр цианокобаламина.

**Ս. Հ. Մինասյան, Լ. Ն. Մխիթարյան, Ջ. Օ. Մանուկյան,
ակադեմիկոս Լ. Ա. Թավադյան**

Վիտամին B12-ի հակապերօքսիլոնադիկալային ակտիվությունը

Թթվածնակենտրոն ռադիկալների կլանման տարողության որոշման (ORAC) և քառակուսի ալիքային վոլտամպերաչափական (SWV) եղանակներով ուսումնասիրվել

է ցիանկոբալամինի (վիտամին B12) հակապերօքսիլոադիկալային ակտիվությունը ջրային միջավայրում, ֆիզիոլոգիական pH և ջերմաստիճանում: Ցույց է տրվել, որ ջրային միջավայրում վիտամին B12-ը, անմիջականորեն ռեակցում է պերօքսիլ ռադիկալների հետ: ORAC մեթոդով ստացված կինետիկական տվյալների հիման վրա առաջին անգամ որոշվել է ցիանկոբալամինի հակապերօքսիլ ռադիկալային տարողությունը: Առաջարկվել են հակապերօքսիլ ռադիկալային մեխանիզմ և ցիանկոբալամինի համապատասխան ռեակցիոն կենտրոն:

**S. H. Minasyan, L. N. Mkhitarian, Z. H. Manukyan,
academician L. A. Tavadyan**

Antiperoxyradical Activity of Vitamin B12

Antiperoxyradical activity of cyanocobalamin (vitamin B12) was studied in aqueous medium at the physiological temperature and pH, using the methods on determination of absorption capacity in relation to oxygen-centered radicals (ORAC) and square-wave voltammetry (SWV). It was established that in aqueous medium vitamin B12 directly reacts with peroxy radicals. Based on the kinetic data obtained by the ORAC method antiperoxyradical capacity of cyanocobalamin was determined for the first time. A mechanism for antiperoxyradical reactivity of cyanocobalamin and appropriate reaction center have been suggested.

Литература

1. *Giedyk M., Goliszewska K., Gryko D.* – Chemical Society Reviews. 2015. V. 44. № 11. P. 3391-3404.
2. *Brown K. L.* – Chemical reviews. 2005. V. 105. № 6. P. 2075-2150.
3. *Gruber K., Puffer B., Kräutler B.* – Chemical Society Reviews. 2011. V. 40. № 8. P. 4346-4363.
4. *Mc Caddon A.* – Biochimie. 2013. V. 95. – № 5. P. 1066–1076.
5. *Misra U. K., Kalita J., Singh S. K., Rahi S. K.* – Mol. Neurobiology. 2017. V. 54. № 2. P.1278–1284.
6. *Bito T., Misaki T., Yabuta Y. et al.* – Redox Biology. 2017. V. 11. P. 21–29.
7. *Mc Caddon A., Hudson P. R.* – Future Neurology. 2007. V. 2. № 5. P. 537–547.
8. *Solomon L.* – Am. J. Med. 2016. V. 129. № № 1. P. 115.9-115.16.
9. *Alzoubi K., Khabour O., Khader M. et al.* – Drug Chem. Toxicology. 2014. V. 37. № 3. P.276–280.
10. *Parker T. L., Miller S. A., Myers L. E.* – Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2010. V. 58. P. 209–217.
11. *Gao G., Alessio H. M., Cutler R. G.* – Free Radical Biology and Medicine. 1993. V. 14. № 3. P. 303-311.
12. *Amorati R., Valgimigli L.* – Free Radical Research. 2015. V. 49. № № 5. P. 633–649.
13. *Derevenkov I. A., Salnikov D. S., Silaghi-Dumitrescu R.* – Coordination Chemistry Reviews. 2016. V. 309. P. 68–83.
14. *Hernandez S. R., Ribero G. G., Goicoechea H. C.* – Talanta. 2003. V. 61. P. 743-753.

15. *Lovander M. D., Lyon J. D., Parr D. L.* – Journal of The Electrochemical Society. 2018. V. 165. № 2. P. G18-G49.
16. *Higashi-Okai K., Nagino H., Yamada K., Okai Y.* – J. UOEH. 2006. V. 28. № 4. P. 359-368.
17. *Ronco A. M., Garrido A., Llanos M. N. et al.* – Lipids. 2005. V. 40. P.259–264.
18. *Рубцов М. В., Байчиков А. Г.* Синтетические химико-фармацевтические препараты. М. Медицина. 1971. 168 с.
19. *Reinhold K., Rens P.* – Liebigs Ann. Chem. 1969. V. 729. P. 231 -233.
20. *Tavadyan L. A., Tonikyan A. K., Minasyan S. H.* – Inorganica Chimica Acta. 2002. V. 328. P. 1-12.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.530

Р. А. Пашаян¹, Л. В. Арутюнян²

Современные изменения геодинамики земной коры территории Армении

(Представлено академиком Б. К. Карапетяном 27/VI 2019)

Ключевые слова: *напряжение, деформация, сейсмичность, гидрогеохимия, геодинамика, вариации.*

Введение. Современная геодинамика – часть общей геодинамики, изучающая движения земных недр и причины, их вызывающие. Геодинамика земной коры территории Армении исследуется современными методами гидрогеодинамики, гидрогеохимии, параметрами наклономерно-деформационных измерений и текущей сейсмичностью. Важное место принадлежит методу гидрогеодинамических наблюдений, перспективность которого доказана при поисках предвестников землетрясений в сейсмоактивных регионах. Гидрогеодинамические показатели весьма чувствительны к изменениям напряженно-деформированного состояния среды. Деформации, развивающиеся в верхних частях земной коры, оказывают влияние на уровень и химический состав подземных вод. Наклонометры и деформографы, работающие в непрерывном режиме, фиксируют медленные процессы. Они позволяют исследовать динамику деформирования земной коры, дают непрерывную картину изменений. Деформационные и сейсмические процессы, изучаемые в современной геодинамике, взаимосвязаны с вариациями геофизических и гидрогеохимических полей, и являются индикатором геодинамического процесса. Основной задачей исследований является всестороннее изучение современных геодинамических процессов в пределах тектонически активных участков земной коры территории Армении. Анализ деформационно-напряженного состояния земной коры, исследуемый во времени и пространстве позволяет изучать динамику геодинамических процессов по всему региону.

В статье рассмотрены данные по сейсмичности, уровню вод в гидрогеодинамических скважинах и наклономерно-деформографическим наблюдениям за последние годы, предоставленным Республиканской службой сейсмической защиты МЧС РА.

Результаты наблюдений. Территория Армении характеризуется зональным строением, обусловленным разграничивающими ее четырьмя разломами глубокого заложения: Лалвар-Мравская, Базумо-Севанская, Анкаван-Сюникская и Ереванская зоны разломов [1]. В гидрогеологическом отношении территория Армении представляет собой высоко приподнятую область дренажа и относится к зоне интенсивного водообмена с направлением стока поверхностных вод от складчатого сооружения в сторону Куринской и Среднеараксинской депрессий [2]. Сейсмотектонические процессы, участвующие в формировании активных геодинамических участков региона, рассмотрены по каталогу землетрясений. Построена карта сейсмичности за 2018 г. по координатам произошедших землетрясений с $M > 2$ (рис. 1,а).

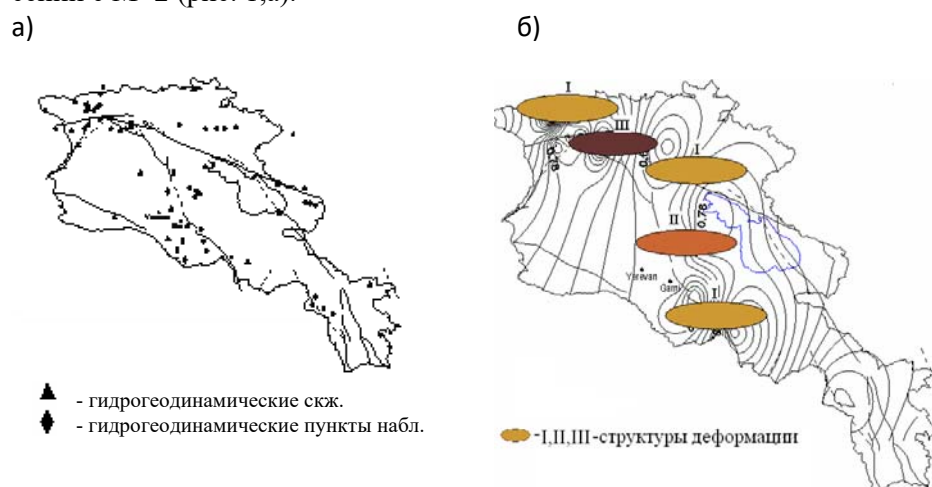


Рис. 1. а – Карты сейсмичности; б – напряженно-деформируемое состояние территории Армении с указанными структурами деформаций:

На карте сейсмичности указана сеть гидрогеодинамических и гидрогеохимических пунктов наблюдений, карта отражает концентрацию эпицентров землетрясений на Джавахетском нагорье, по Базум-Севанскому глубинному разлому, в центральной части региона и несколько эпицентров на ЮЗ территории Армении. Определялись эпицентральные расстояния от эпицентров землетрясений до пунктов наблюдений (ГГД, ГГХ) для определения величин расчетных деформаций [3], по которым строилась карта напряженно-деформированного состояния земной коры региона (рис. 2,б). Карта отражает полученные структуры деформации в виде сжатия и растяжения в результате создавшегося напряжения в сейсмоактивной среде земной коры под воздействием сил, вызывающих деформации. Коэффициент Лоде – Надаи, введенный в сейсмологическую практику в работе [4], определяет вид деформации (сжатие, растяжение, сдвиг). Величина коэффициента меняется от 1 до -1. При $\mu_e = 1$ имеют место деформации сжатия; при $\mu_e = -1$ – растяжения, при $\mu_e = 0$ – сдвига. В таблице

приводятся рассчитанные значения коэффициента деформаций Лоде – Надаи, вызванных сеймотектоническими процессами в земной коре территории Армении (рис. 1,а,б)

Координаты землетрясения		Наблюдательные пункты (ГГД*, ГГХ)	Глубина Н	Магнитуда М	Эпицентральное расстояние Δ , км	Расчетная деформация, $\mathcal{E}$	Коэффициент Лоде – Надаи $\mu_{\mathcal{E}}$	Вид деформации
φ	λ							
41,07	44,00	10*	10	3,5	12	1,25E-07	-1	Растяжение
40,90	44,27	12*	8	4,4	11	1,98E-06	0	Сдвиг
39,80	45,16	22*	10	3,2	16	2,29E-08	1	Сжатие
40,87	44,93	15*	10	2,2	30	2,06-09	-1	Растяжение
39,85	44,94	Суренаван	10	2,3	20	9,24E-09	1	Сжатие

Исходя из полученных результатов общую картину деформирования земной коры региона (рис. 1,б) можно охарактеризовать следующим образом. Деформации в пределах Джавахетского нагорья за счет произошедших слабых ($M=2.5-3.5$) землетрясений являются деформациями растяжения. На участке Базум-Севанского узла разломов при землетрясениях с $M=2.2-4.4$ характер деформации сдвиговой, в центральной части региона имеет место деформация растяжения, на ЮЗ региона близ сейсмоактивного Гарнийского разлома при землетрясениях с $M=2.2-3.2$ – деформация сжатия. Анализ результатов указывает на геодинамическую активность деформированных участков региона в приразломных зонах с сеймотектоническими процессами. Таким образом, становится очевидным, что современная геодинамика недр непосредственно связана с повышением активности разломных зон.

Гидрогеодинамические и гидрогеохимические исследования. На тектонически активных участках территории Армении проведены режимные наблюдения за уровнем подземных вод. Детальное изучение режимобразующих факторов позволило выявить гидрогеодинамические эффекты, вызванные влиянием современных тектонических деформаций. Гидрогеодинамические эффекты изменения напряженно-деформируемого состояния среды являются индикатором современных геодинамических процессов. Наблюдения ведутся за неглубокими водоносными горизонтами гидрогеодинамических скважин, пробуренных на сейсмоактивных участках территории Армении. Коэффициент информативности наблюдательной сети региона Армении равен 0.54 [5]. Коэффициент информативности каждой скважины зависит от близости скважины к глубинному разлому –

чем ближе к разлому, тем выше коэффициент информативности. На рис. 2, а-в приводятся графики изменения уровня воды в скважинах (Ашоцк – 10, Ширакамут – 12, Ехегнадзор – 22).

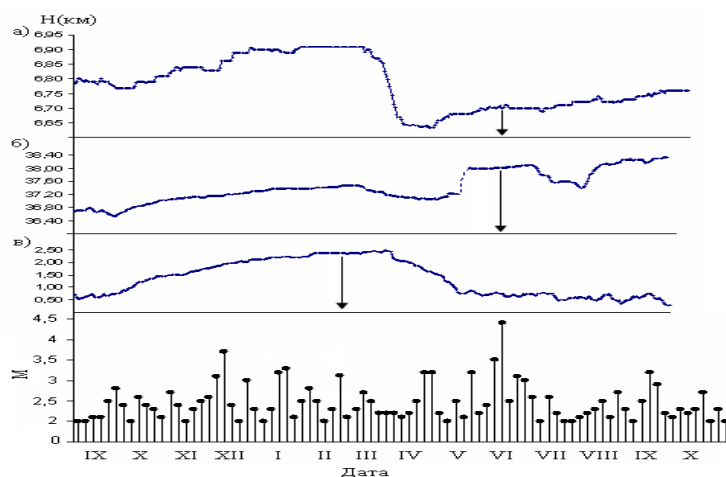


Рис. 2. Вариации уровня вод в гидрогеодинамических скважинах 12 (а), 10 (б), 22 (в); на последней диаграмме вертикальными линиями изображены моменты землетрясений в величинах магнитуд.

Скважина Ашоцк пробурена на севере региона на Джавахетском нагорье, где имеет место активность сейсмотектонических процессов. За время исследований вокруг скважины произошло 10 землетрясений с $2 < M \leq 3.5$. Перед землетрясением 06.06.2018, $M=3.5$, наблюдалась вариация понижения уровня воды в скважине (рис. 2,а), что, вероятно, указывает на то, что в окрестности скважины преобладали деформации растяжения, которые приводили к приросту порово-трещинной емкости и повышению проницаемости пласта. Скважина Ширакамут пробурена в зоне активного Спитакского разлома и в пределах Спитакского тектонического блока Транскавказского поперечного поднятия. Сейсмотектоническая активность места расположения скважины складывается из двух факторов: геодинамики глубинного разлома (подвижки вдоль разлома) и произошедших землетрясений. Землетрясение 06.06.2018, $M=4.4$, произошло недалеко (16 км) от скважины и вызвало ступенчатое изменение уровня воды (рис. 2,б), соответствующее деформации сдвига по значению коэффициента Лоде – На-даи (таблица). На фоне деформации сдвига проявляется чередование участков с деформацией сжатия и участков с деформацией растяжения. Чередование ступенчатых вариаций уровня воды проявляется на фоне повышения уровня воды (тренд) в скважине, что указывает на наличие периодически слабых деформаций земной коры. Скважина Ехегнадзор расположена в пределах Вайкского четко выраженного тектонического блока. Вариации уровня воды в скважине (рис. 2,в) перед землетрясением 25.02.2018, $M=3.2$, характеризуют повышение уровня, вызванное сокра-

щением порового трещинного пространства среды, происходящим под действием сжимающих напряжений; в окрестностях скважины сформирована деформация сжатия (таблица). Таким образом, по гидрогеодинамическим данным выявлены различия в характере деформационных процессов на различных участках земной коры территории Армении.

Гидрогеохимические методы также помогают фиксировать изменения напряженности земной коры во времени и пространстве. Сеть гидрогеохимических пунктов наблюдений института Геофизики и инженерной сейсмологии НАН РА охватывает в основном центральную часть территории Армении, минеральные воды источников Бжни, Арзни, Веди и Суренаван (рис. 1,а). Месторождения минеральных вод приурочены к тектоническим зонам активных глубинных разломов. Геохимическими методами исследуются химический состав вод и реакция катионного и анионного состава на изменение геодинамики земной коры. Исходя из активации сейсмотектонических процессов в центральной части региона, в частности, в области распределения вод минерального источника Суренаван выявлены изменения значений химического элемента Cl. Анион Cl⁻ является одним из глубинных составляющих минеральных вод, а геодинамические процессы, происходящие в земной коре, содействуют колебанию содержания хлора в составе воды. Построен график вариации химического элемента в минеральной воде источника Суренаван (рис. 3).

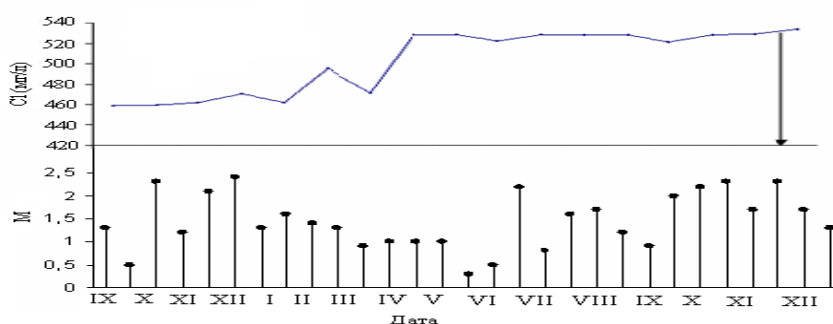


Рис. 3. Вариации аниона Cl⁻ в минеральной воде Суренаван и моменты землетрясений в магнитудах.

Как видно из графика, после некоторой флуктуации с повышенной амплитудой содержание хлора к концу 2017 г. резко поднялось, далее флуктуации хлора с меньшей амплитудой продолжались на одном уровне до произошедшего землетрясения с M=2.3. Повышение содержания хлора, возможно, происходит под действием сжимающих напряжений земной коры, а вокруг источника по значению коэффициента Луде – Надаи (таблица) имеет место деформация сжатия.

Для визуального изменения катионного и анионного состава вод за короткие промежутки времени составлен гидрогеохимический профиль А. А. Бродского (рис. 4) [6].

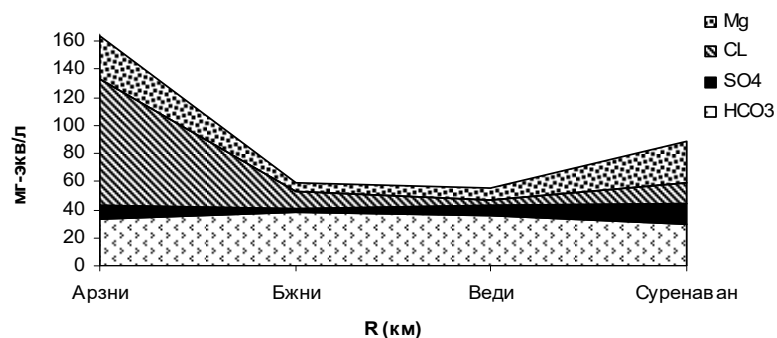


Рис. 4. Гидрогеохимический профиль минеральных вод центральной части Армении.

По горизонтальной оси профиля отложены расстояния между минеральными источниками отбора проб воды, по вертикали – содержание ионов в мг-экв/л. Гидрохимический профиль позволяет проследить изменение химического состава минеральных вод по определенному направлению, а также дать количественную характеристику химических компонентов в любой точке по створу скважины. Таким образом, полученные данные по гидрогеохимии минеральных вод, вариации химических компонентов и количественному составу сопоставляются с изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры Армении

Наклономерно-деформографические исследования. Комплексом непрерывных наклономерно-деформографических измерений, проводимых в Гарнийской геофизической обсерватории РСС МЧС РА, получены данные для изучения современных движений земной коры региона и проявлений сейсмической активации района. Для этого необходимы длительные непрерывные ряды измерений наклонов, деформаций и приливов. По имеющимся на сегодняшний день данным определено, что современные движения земной коры в регионе отражаются в ежесуточных наклономерных измерениях по двум направлениям: СЮ-ВЗ [7]. Процессы сейсмической активации проявляются по среднесуточным вариациям на записях наклономерно-деформационных измерений. Графики, построенные по среднесуточным значениям деформационных измерений, приводятся на рис. 5. Кривые среднесуточных вариаций деформации по направлениям С-Ю и В-З одного знака, деформация в направлении С-Ю (рис. 5,а) показана на первом графике в виде выпуклой кривой с медленным убыванием величины деформации, а кривая деформации в направлении В-З (рис. 5,б) имеет форму резких спадов и подъемов величин деформации. Возможно, это связано с тем, что по латерали исследуемого участка имеет место деформация сжатия.

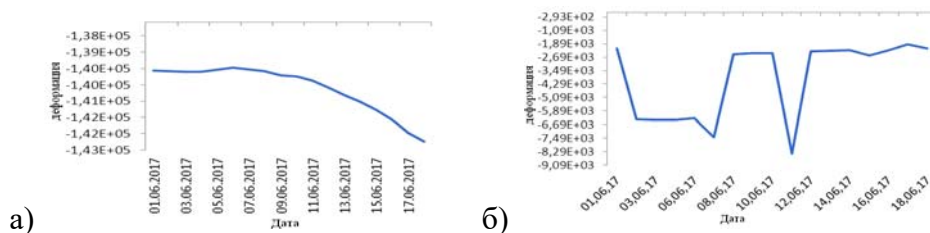


Рис. 5. Графики среднесуточных вариаций значений деформации за 1-18.06.2017: а – кривая значений деформации в направлении С-Ю, б – кривая значений деформации в направлении В-З.

Объемная деформация за сутки рассчитывалась по формуле $D_{об} = 2/3 D_{сн} + D_{вз}$. Таким образом, рассчитана посуточная объемная деформация за тот же период времени, что были построены графики среднесуточных вариаций деформации по направлениям С-Ю и В-З. Вариации объемной деформации исследуемого участка земной коры приведены на рис. 6.

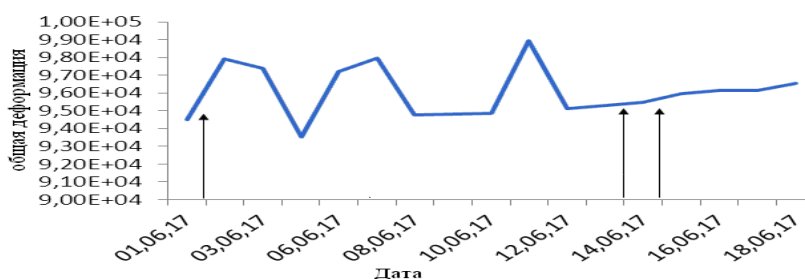


Рис. 6. График изменения объемной деформации за тот же период, что были составлены среднесуточные вариации деформаций; стрелками указаны землетрясения.

Исходя из полученного графика вариации общей деформации по характеру колебаний соответствуют среднесуточным изменениям деформации в направлении В-З, т.е. именно в этом направлении имеет место изменение напряженно-деформированного состояния земной коры региона. Возможно, одной из причин отмеченного выше изменения явились несколько местных землетрясений с $M > 2$ в радиусе 30 км от Гарнийской геофизической обсерватории, в штольне которой проводятся деформографические измерения, другой причиной, возможно, была близость пункта деформографических измерений от активного Гарнийского глубинного разлома.

Таким образом, по результатам примененных методов изучения современных геодинамических процессов составлена карта напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении (рис. 1,б), на которую нанесены участки деформаций разного знака. В Ширакской зоне выявлена деформация сжатия (таблица), в приразломной зоне глубинного Спитакского разлома определена сдвиговая деформация, а в цен-

тральной части региона наблюдается чередование деформаций сжатия и растяжения. В целом вырисовывается общая картина, отражающая геодинамику территории Армении.

Выводы. Внедрение гидрогеологических наблюдений в практику геодинамических исследований позволяет оценить влияние современных геодинамических процессов на подземные воды.

По гидрогеодинамическим данным выявляются различия в характере деформационных процессов на различных участках.

Геохимические методы помогают производить реконструкцию напряженности земной коры за короткие промежутки времени.

Развитие сети наклономерно-деформографических станций дает возможность изучать поведение не только отдельных участков земной коры территории Армении, но и движений тектонических участков относительно друг друга и смещений по разломам.

¹Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА

²Институт общей и неорганической химии им. М. Манвеляна НАН РА
e.mail: romellapashayan@sci.am

Р. А. Пашаян, Л. В. Арутюнян

Современные изменения геодинамики земной коры территории Армении

Проведено изучение современных изменений геодинамики земной коры территории Армении гидрогеодинамическими, гидрогеохимическими и наклономерно-деформографическими методами. Результаты сопоставлены с текущей сейсмичностью региона за исследуемый период времени. Построена карта напряженно-деформированного состояния земной коры региона с указанием деформированных участков территории. Определен вид образующейся деформации (сжатие, растяжение, сдвиг). На составленной карте сейсмичности выделены активные сейсмотектонические участки.

Ռ. Ա. Փաշայան, Լ. Վ. Հարությունյան

Երկրային ընդերքի երկրադինամիկայի ժամանակակից փոփոխությունները Հայաստանի տարածքում

Հայաստանի տարածքում Երկրի ընդերքի երկրադինամիկայում ընթացիկ փոփոխությունների ուսումնասիրությունն իրականացվել է հիդրոերկրադինամիկ, հիդրոերկրաքիմիական և թափանցիկ-դեֆորմոգրաֆիկ մեթոդներով: Օգտագործվող մեթոդների արդյունքները համեմատվել են ժամանակի սեյսմիկության հետ ուսումնասիրված ժամանակաշրջանի համար: Ստացված տվյալների վերլուծությունը թույլ է տալիս մեզ կառուցել տարածաշրջանի երկրային լարվածադեֆորմացիոն վիճակի քարտեզը՝ նշելով տարածքների դեֆորմացված մասերը: Սահմանված ձևավորման ձևը (սեղմում,

լարվածություն, խաչմերուկ) որոշվում է: Ակտիվ սեյսմատեկտոնային տարածքները կարևորվում են կազմված սեյսմիկ քարտեզի վրա:

R. A. Pashayan, L. V. Harutyunyan

Modern Changes in the Geodynamics of the Earth's Crust in Armenia

The study of the current changes in the geodynamics of the Earth's crust in the territory of Armenia was carried out by hydrogeodynamic, hydrogeochemical, and tilt-dimensional-deformographic methods. The results of the applied methods were compared with the current seismicity of the region for the studied period of time. The analysis of the obtained data allowed us to construct a map of the stress-strain state of the earth's crust in the region, indicating the deformed parts of the territory. The type of the formed deformation (compression, tension, shear) is determined. The active seismotectonic areas are highlighted on the compiled seismic map.

Литература

1. *Асланян А. Т.* Региональная геология Армении. Ереван. Айпетрат. 1968. 408 с.
2. Геология Армянской ССР. Т. IX, Минеральные воды. Ереван. Изд-во АН АрмССР. 1969. 523 с.
3. *Добровольский И. П., Зубков С. И., Мячкин В. И.* В сб.: Моделирование предвестников землетрясений. М. Наука. 1980. С. 7-43.
4. *Юнга С. Л.* – Изв.АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10.С. 14-23.
5. *Пашаян Р. А.* Изменения гидрогеодинамических эффектов как предвестники землетрясений на территории Армении. Канд. дис. Ереван. 1989. 120 с.
6. *Бродский А. А.* Основы гидрогеохимического метода поисков сульфидных месторождений. М. Недра. 1964. 258 с.
7. *Ахвердян Л. А., Пашаян Р. А., Арутюнян Л. В.* – Доклады НАН РА. 2018. Т. 118. № 3. С. 260-267.

РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА

УДК 611.08 + 614.8.028 + 577.34 + 53.086

Г. П. Саркисян¹, Н. С. Багдасарян²

Проблема биодозиметрии лучевых поражений и ее решение методом цифровой обработки микроизображений эритроцитов

(Представлено чл.-кор. НАН РА Э. С. Геворкяном 9/VIII 2019)

Ключевые слова: радиационная катастрофа, лучевое поражение, биодозиметрия, эритроцитометрия.

Аварии на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.) и на АЭС Фукусима-1 (11 марта 2011 г.) показали, что вопросы ранней диагностики лучевого поражения, оценки степени его тяжести, разработки методов оценки эффективности средств и схем спецификаций терапии лучевой болезни, а также прогнозирования ее исхода являются актуальными проблемами современной медицинской и радиационной биофизики [1-10].

Обзорные работы последних лет по разработке методов ранней диагностики лучевого поражения организма свидетельствуют, что в настоящее время не имеется достаточно адекватных, отвечающих современным требованиям решения этой проблемы. Существующие методы биологической индикации лучевого поражения (например, цитогенетические, гематоморфологические, биофизические) трудоемки и дорогостоящи.

С точки зрения практической медицины весьма актуальной проблемой является разработка недорогого экспресс-метода индикации радиационного поражения людей в результате ядерных катастроф (ЯК), например, после аварии в атомной промышленности или после применения ядерного оружия. Следует отметить, что особенно в первые часы-сутки после аварии возникает необходимость оказания первичной медицинской помощи многотысячному пострадавшему контингенту. Это – группирование по степени тяжести поражения, это – прогнозирование исхода острого лучевого поражения, это – определение индивидуальной эффективной схемы для каждого пострадавшего и проведение экстренных противорадиационных лечебно-профилактических мероприятий на ранней стадии после радиационного поражения (РСПП).

Среди методов диагностики тяжести острого лучевого поражения сравнительно близким по поставленной цели можно считать запатентованный в РФ способ (RU №2099709, G01N33/483) [11], авторы которого предложили новый подход к исследованию периферической крови путем одномоментного определения прочности эритроцитарных агрегатов, содержания лейкоцитов и полупериода агрегации эритроцитов, с последующим установлением корреляции между тяжестью острого лучевого поражения и максимальным отклонением величины индекса тяжести лучевого поражения, который рассчитывают по формуле $J = Ud/\tau(L+n)$, где J – индекс тяжести лучевого поражения (отн. ед); Ud – максимальная прочность агрегатов эритроцитов (В); τ – полупериод агрегации эритроцитов (с); L – содержание лейкоцитов (тыс./мкл); n – поправочный коэффициент, n равен 0 при L , не равном нулю, n равен 0.1 при L , равном нулю, и при максимальном отклонении J , зарегистрированном в диапазоне от 0.31 до 3.0, диагностируют легкое лучевое поражение, от 3.1 до 9.0 – среднее, от 9.1 и выше – тяжелое лучевое поражение, а в диапазоне величин J от 0.05 до 0.30 диагностируют норму.

Основные недостатки данного метода – это, во-первых, его трудоемкость и дороговизна; во-вторых, ограниченность применения из-за резкого снижения уровня лейкоцитов и лимфоцитов (вплоть до полного отсутствия) при высоких и средних дозах облучения, которые не позволяют установить тяжесть острого лучевого поражения и прогнозировать его исход. Эти недостатки снижают также чувствительность метода.

Общепринята точка зрения, что в процессе лучевой болезни, вызванной различными дозами облучения, динамика сдвига исследуемого параметра отражает изменение тяжести лучевого поражения организма. Степень тяжести лучевого поражения организма зависит от двух основных факторов: величины дозы облучения и исходного функционального состояния организма. Следовательно, очевидна необходимость разработки нового способа ранней диагностики тяжести острого лучевого поражения, который позволит без больших затрат времени и средств обеспечить индивидуальный подход в достижении поставленной цели. Также очевидна необходимость выбора такого параметра исследования, который поддается измерению на протяжении всей РСПП. С этой точки зрения эритроциты уникальны по их совокупной роли и значимости в биологическом, медицинском и научно-методическом аспектах. В настоящее время всё более актуальным становится изучение популяции эритроцитов как самостоятельного объекта, а также изучение его характеристик в различных средах и условиях, не являющихся для эритроцитов физиологически естественными. Во многом это связано с реализацией фундаментальной идеи использования эритроцита в качестве естественного высокоэффективного биодатчика состояния и патологических изменений в организме человека и животных, а также экологического состояния окружающей среды [1, 4, 6-10].

Весьма эффективным решением проблемы обнаружения лучевых по-

ражений является метод оценки тяжести и прогнозирования исхода острого лучевого поражения путем введения интегрального показателя – величины относительного сдвига (ВОС) среднего радиуса эритроцитов периферической крови (СРЭПК) по сравнению с нормой. В предложенном методе автоматизированную оценку данного показателя осуществляют путем компьютерной обработки цифровой информации микроизображения эритроцитов в тонком слое периферической крови с помощью оптического микроскопа и ПЗС-камеры (прибора с зарядовой связью) на разных стадиях раннего пострadiaционного периода (РПП) [12, 13].

Оценка СРЭПК в тонком слое периферической крови и определение ВОС по сравнению с нормой осуществляется на устройстве, которое состоит из оптического микроскопа, держателя образца крови, ПЗС-камеры для цифровой регистрации микроизображения исследуемого участка тонкого слоя крови и ЭВМ для обработки цифровой информации. Тонкий слой периферической крови готовят по следующей схеме: производят забор крови у исследуемого пациента и разбавляют её 0.9% раствором хлорида натрия в 200 раз. Затем смачивают предметное стекло дистиллированной водой и с помощью микропипетки наносят на него 1 мкл разбавленной крови, ожидают 20 с и закрывают слой покровным стеклом. Далее с помощью оптического микроскопа и ПЗС-камеры проводят цифровую регистрацию микроизображения тонкого слоя микрообъектов – эритроцитов.

Для каждого животного, подвергнутого однократному тотальному облучению определенной дозой, готовят тонкий слой периферической крови в норме (за сутки до облучения) и на разных стадиях РПП – через 24; 48 и 72 ч после облучения.

Демонстрация разработанного метода осуществляется следующим образом. Готовят три группы животных, каждую из которых отдельно подвергают однократному тотальному облучению: в дозе 300 Р (сублетальная доза, при которой в течение 30 суток все животные выживают), в дозе 600 Р (полусмертельная доза для этого вида животного – LD50/30, при которой 50% облученных животных в течение 30 суток выживают, а 50% за этот срок погибают) и в дозе 1000 Р (абсолютно смертельная доза, при которой все облученные животные в течение 7 суток РСРП погибают). Создается банк цифровых данных микроизображений монослоев крови (для каждого животного в количестве 4). Вся полученная информация передается на ЭВМ для цифровой обработки. Дальнейшая работа ведется с цифровым банком данных микроизображений исследуемого участка тонкого слоя крови.

Такая технология приводит к значительному упрощению реализации метода, обеспечивает экспрессную оценку ВОС СРЭПК, повышает производительность труда и достоверность результатов анализа.

На рис. 1 представлен график временной зависимости ВОС СРЭПК (в процентах по сравнению с нормой; норма (Н) – 0%) животных, подверг-

нутых тотальному однократному облучению (приведены данные в норме и через 24; 48 и 72 ч после облучения дозами 300, 600 и 1000 Р).

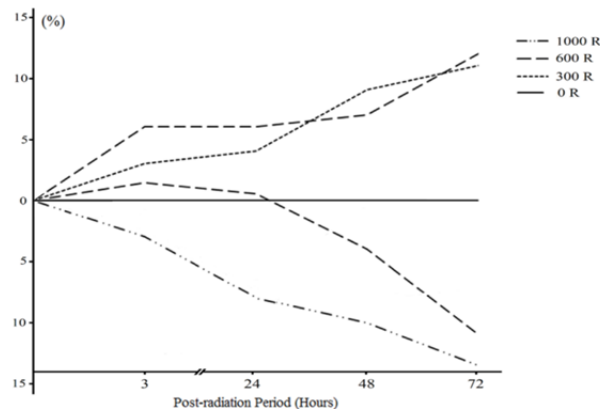


Рис. 1. Изменение ВОС СРЭПК на РПП для разных доз облучения.

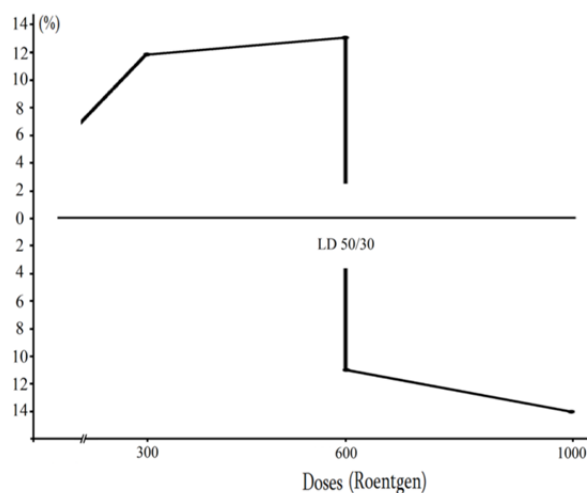


Рис. 2. Зависимость ВОС СРЭПК от дозы (кривая доза-эффект) через 72 ч после облучения.

На рис. 2 представлен график дозовой зависимости ВОС СРЭПК животных (в процентах по сравнению с нормой; норма (Н) – 0%), через **трое суток** после тотального однократного облучения в дозах 300, 600 и 1000 Р.

О тяжести острого лучевого поражения судят по результатам оценки выбранного параметра ВОС СРЭПК по сравнению с нормой – после первых, вторых и третьих суток РПП (см. рис. 1). Прогнозирование исхода острого лучевого поражения для данной дозы делают через **трое суток** после лучевого поражения путем нахождения ВОС СРЭПК из корреляционной кривой (см. рис. 2).

На рис. 1 видно, что для дозы 300 Р на вторые сутки РПП на 6% уве-

личивается ВОС СРЭПК и через трое суток превышает 10%. На основании такого результата можно утверждать, что когда регистрируется увеличение ВОС СРЭПК по сравнению с нормой более чем на 10%, имеет место лучевое поражение средней тяжести и прогнозируется, что животное выживет. В литературе эту дозу называют дозой средней тяжести (или сублетальной дозой).

Для дозы 1000 Р (пунктирная линия с двойными точками на рис. 1) через 24 ч после лучевого поражения ВОС СРЭПК уменьшается на 7%, а через 72 ч уменьшение достигает 14%. Следовательно, если ВОС СРЭПК через 72 ч становится меньше по сравнению с нормой на 14% и более, это соответствует абсолютно смертельной дозе, и можно прогнозировать, что в течение 7 суток животное погибнет.

Как видно на рис. 1, при тотальном облучении полусмертельной дозой 600 Р изменение ВОС СРЭПК проявляет достоверное качественное и количественное различие для погибающих и выживающих подгрупп (пунктирные линии с противоположной динамикой поведения на рис. 1). У выживающей подгруппы имеет место рост ВОС СРЭПК в течение всего РПП и через 24 ч достигает более 7%, через 48 ч – более 8%, а через трое суток превышает 12%. Для погибающей подгруппы достоверное уменьшение ВОС СРЭПК по сравнению с нормой превышает 10% спустя 72 ч после лучевого поражения. Важно заметить, что при дозе облучения 600 Р динамика изменения ВОС СРЭПК в РПП проявляет тенденции аналогично сублетальной (300 Р) и абсолютно смертельной (1000 Р) дозам облучения.

Таким образом, метод цифровой обработки микроизображений эритроцитов позволяет провести достоверное разделение облученных организмов на подгруппы по степени тяжести поражения при одинаковом фоне радиации окружающей среды, особенно когда уровень радиации близок к полусмертельной дозе облучения для данного вида животного. Метод обеспечивает повышение точности прогнозирования исхода острого лучевого поражения в РПП, а также позволяет решить проблемы повышения экспрессности и снижения стоимости биоиндикации лучевых поражений.

¹ Институт химической физики им. А. Н. Нальбандяна НАН РА

² Международный послеузовский медико-биологический учебный центр при МОНКС РА

e.mail: hrachya_sargsyan@mail.ru, arian_serg@yahoo.com

Г. П. Саркисян, Н. С. Багдасарян

Проблема биодозиметрии лучевых поражений и ее решение методом цифровой обработки микроизображений эритроцитов

Представлен метод оценки степени тяжести острого лучевого поражения и прогнозирования его исхода в раннем пострадиационном периоде. С помощью цифровой обработки микроизображений монослоя крови оценивается средний радиус эритроцитов в норме и после первых, вторых и третьих суток раннего

пострадиационного периода. Степень тяжести острого лучевого поражения определяется по величине относительных сдвигов среднего радиуса эритроцитов периферической крови по сравнению с нормой. Прогнозирование исхода острого лучевого поражения делается из корреляционной кривой доза-эффект, построенной после третьих суток раннего пострadiационного периода.

Հ. Պ. Սարգսյան, Ն. Ս. Բաղդասարյան

**Ճառագայթային ախտահարման կենսադոզաչափության հիմնախնդիրը
և նրա լուծումը էրիթրոցիտների միկրոպատկերների թվային
վերամշակման մեթոդով**

Ներկայացված է հետճառագայթային վաղ շրջանում ճառագայթային ախտահարման ծանրության աստիճանի գնահատման և նրա էլքի կանխորոշման մեթոդ: Արյան միաշերտի միկրոպատկերի թվային վերամշակման միջոցով գնահատվում է էրիթրոցիտների շառավղի միջինը նորմայում և հետճառագայթային վաղ շրջանի առաջին, երկրորդ և երրորդ օրերից հետո: Սուր ճառագայթային ախտահարման ծանրության աստիճանը որոշվում է պերիֆերիկ արյան էրիթրոցիտների շառավղի միջինի նորմայի համեմատ հարաբերական շեղման մեծությամբ: Սուր ճառագայթային ախտահարման էլքի կանխատեսումը կատարվում է հետճառագայթային վաղ շրջանի երրորդ օրվանից հետո կառուցված դոզա-էֆեկտ կորելյացիոն կորի միջոցով:

H. P. Sargsyan, N. S. Baghdasaryan

**The Problem of Radiation Injury Biodosimetry and Solving it
by the Method of Digital Processing of Erythrocyte Microimages**

In the current article a method for early diagnosis of severity and prediction of the outcome of acute radiation injury in the early post-radiation period is discussed. By means of digital processing method of erythrocyte micro images the average radius of peripheral blood erythrocytes in norm and after the first, second and third days of the early post-radiation period is estimated. The severity of acute radiation injury is determined by the magnitude of the relative shifts of peripheral blood erythrocytes average radius as compared to the norm. Prediction of the outcome of acute radiation injury is implemented on the bases of collation of the relative shift as compared to the norm for different stages, followed by finding a point on the dose-effect correlation curve three days after radiation injury.

Литература

1. *Гофман Дж.* Чернобыльская авария: радиационные последствия для настоящего и будущих поколений. Минск. Выш. шк. 1994. 574 с.
2. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ – Атомная энергия. 1986. Т. 61. Вып. 51. С. 301-320.

3. Авария на АЭС «Фукусима-Дайити» в Японии, начавшейся 11 марта 2011 г. Докл. генеральн. директора на 59-й Генеральной конф. МАГАТЭ. Вена. МАГАТЭ. 2015. 278 с. <https://www.twirpx.com/file/1775975/>.
4. Ильин Б. Н. Реалии и мифы Чернобыля. М. ALARA limited. 1994. 446 с.
5. Lloyd D. C., Edwards A. A. In: Chromosome aberrations: basic and applied aspects, ed. by G. Obe, A.T.Natarajan. Berlin. Springer. 1989. P. 212-223.
6. Durante M. et al. – Int. J. Radial Biol. 1998. V. 74. P. 45 7-462.
7. Hande M. P. et al. – Am. J. Hum. Genet. 2003. .V. 72. P.1162-1170.
8. UNSCEAR Report: Sources and effects of ionizing radiation, Annex G. 2000. P. 73-176.
9. Lucas J. N. et al. – Int. J. Radiat. Biol. 1989. V. 56. P. 35-44.
10. Корнеев Н. А. – Агрохимический вестник. 2001. № 3. С. 2-9.
11. Тухватулин Р. Т., Костеша Н. Я., Аносова Н. В., Новикова Л. К. Способ диагностики тяжести острого лучевого поражения. Патент RU 2 099 709, G01N 33/483, 1997.
12. Квеглис Л. И., Кашкин В. Б. Диссипативные структуры в тонких нанокристаллических пленках. Красноярск. Сибирский федеральный ун-т. 2011. 204 с.
13. Саркисян Г. П., Саркисян А. Г., Багдасарян Н. С. и др. Способ ранней диагностики и прогнозирования исхода острого лучевого поражения. Патент на изобретение РФ. N2513999 от 25.02.2014г.

**МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
МЕДИЦИНА**

УДК 577:54:53

Академик В. М. Арутюнян

**Медицинская диагностика с использованием
микроэлектронных полупроводниковых газовых сенсоров**

(Представлено 7/VII 2019)

Ключевые слова: *полупроводниковый газовый сенсор, выделяемый воздух, диагноз, детектор.*

Еще в 1784 г. Антуан Лавуазье писал, что из всех явлений жизни нет более поразительного и более заслуживающего внимания физиков и физиологов, чем явления, сопровождающие дыхание [1]. Сегодня врач не только опрашивает и осматривает пациента, но и направляет его в лабораторию – сдать анализы крови, мочи, выполнить электрокардиограмму и т.д. Но до сих пор в обычных поликлиниках и больницах никто не направляет больных на анализ выдыхаемого воздуха. Между тем одно из важнейших направлений современной медицины – неинвазивная диагностика больного, в основе которой лежит анализ выдыхаемого им воздуха в специальное устройство. Речь идет о самом выдыхаемом воздухе (ВВ), его химическом составе и летучих веществах, выделяемых из организма человека через легкие. Надо только сделать выдох и через несколько секунд или минут получить результаты анализа. Перспективность неинвазивного направления в диагностике заболеваний очевидна – нет неприятных ощущений, обеспечена полная безопасность от заражения вирусным гепатитом, СПИДом и другими инфекциями.

В зависимости от уровня основного обмена человек выделяет через легкие в среднем около 5-18 л угарного газа СО и 50 г воды в час. А с ними – огромное количество микропримесей летучих соединений, т.е. образуется многокомпонентная газовая смесь, которая скапливается сначала в альвеолах легких. Надо искать причину этого либо в поступающих продуктах питания (источниках образования летучих веществ), либо во внутренних органах, либо в крови, сосудах, поте и моче. По результатам исследования выдыхаемых человеком летучих веществ можно судить о характере питания – достаточности углеводов, избытке жиров и алкоголя. По

избытку или недостатку какого-либо химического компонента в спектре - дышаемого воздуха можно предположить также наследственную ферментопатию и наличие различных заболеваний. Благодаря большой поверхности легких летучие вещества (этанол, аммиак, ацетон и др.) очень быстро переходят из кровяного русла во внешнюю среду с выдыхаемым воздухом. Именно смесь различных молекул, выделяемых человеком, и составляет индивидуальный, неповторимый запах пациента. В целом ряде случаев этот запах позволяет сразу же поставить правильный диагноз. Сладковатый “печеночный запах” ВВ обусловлен нарушением обмена ароматических соединений и накоплением продукта превращения метионина – метилмеркаптана. Этот запах сырой печени часто преследует больных раком поджелудочной железы и может быть одним из первых симптомов этого недуга. Запах аммиака в ВВ характерен при заболеваниях почек и уремии, “мышинный запах” – у больных наследственной фенилкетонурией, запах сиропа – при нарушении метаболизма жирных кислот и накоплении кетокислот и аминокислот в крови и моче, запах ацетона – у больных сахарным диабетом. Резкий специфический запах изо рта – симптом ряда заболеваний полости рта и желудка (стоматит, пародонтоз, гастрит, язвенная болезнь и рак желудка). При сердечно-легочной недостаточности от больных часто исходит неприятный кисловатый запах недоокисленных продуктов обмена, связанный с неполным сгоранием белков, жиров и углеводов в печени. Необычный постоянный запах – это грозный симптом растущей опухоли передних отделов мозга. При инсульте с неблагоприятным исходом у больных выделяется намного меньше ацетона, чем у здоровых людей. В то же время диабетиков, также впавшие в кому, выдыхают в десятки и сотни раз больше ацетона, чем здоровые. У больных сахарным диабетом, сердечно-сосудистой патологией, у детей с бронхиальной астмой, диатезом, у беременных женщин при токсикозах первой половины беременности содержание ацетона и этанола значительно отличается от здоровых лиц. Заметим также, что с помощью полупроводниковых сенсоров можно с успехом распознавать вещества без запаха, как, например, окись углерода (угарный газ) или углекислый газ.

Конечно же, возможности физико-химических исследований газовой фазы не ограничиваются анализом ВВ. Можно собирать и изучать пробы внутренних полостных газов: из разных участков бронхов при бронхоскопии, из желудка при гастроскопии, из толстой кишки при колоноскопии, из мочевого пузыря при цистоскопии, из полости матки при гистероскопии. Сегодня речь идет о возможности разработки индивидуального метаболического профиля больного.

В таблице приведены данные о возможностях наблюдения различных болезней при выделении конкретных газов. Естественно, собранный в таблице материал не претендует на полноту. В частности, в ее основе лежат результаты, приведенные в работах [2-22].

Помимо вышеизложенного анализ дыхания позволяет обнаружить (диагностировать) рак молочной железы, желудка, легких, яичников, рев-

матоидные заболевания, острый инфаркт миокарда, болезни десен, кариес, бактериальный дисбаланс на языке, ретинированные зубы мудрости, обезвоживание, апноэ сна, гастроэзофагеальную рефлюксную болезнь, язву желудка и двенадцатиперстной кишки и др.

ГАЗЫ	Газообразные молекулы в выдохе человека и их диагностическая значимость
Оксид азота (NO)	Болезни органов дыхания (астма, хроническая обструктивная болезнь легких (COPD), инфекция верхних дыхательных путей и др.), ринит, болезни органов пищеварения (воспалительные процессы в желудке (гастрит, гепатит, колит), в том числе инфекция <i>Helicobacter pylori</i> , рак органов пищеварения), гипертермия, тяжелый сепсис
Моноксид углерода (CO)	Анемии (гемолитическая, сидеробластическая, серповидноклеточная), карбоксигемоглобинемия при остром и хроническом облучении, длительное пребывание при повышенном содержании O ₂ , гипербилирубинемия новорожденных, окислительный стресс, гематомы, гемоглобинурия, преэклампсия, инфекции, талассемия, болезни органов дыхания (астма, инфекции, инфекция дыхательных путей, воспаление легкого, пневмония легкого)
Аммиак (NH ₃)	Болезни почек и печени (почечная недостаточность: при нефритах, гипертонической болезни, атеросклерозе почечных артерий, токсикозе и нефропатии беременных, токсических поражениях почек, недостаточность печени при желтухах, гепатитах, циррозе печени, токсическом гепатите), острая и хроническая лучевая болезнь, метаболизм моноаминов в легких
Водород (H ₂)	Болезни органов пищеварения (расстройства пищеварения младенцев, расстройства желудочно-кишечного тракта, анаэробные бактерии в толстой кишке, мальабсорбция углеводов)
Перекись водорода H ₂ O ₂	Болезни органов дыхания (астма, хроническая обструктивная болезнь легких (COPD), рак легкого, ослабленная дыхательная функция легких и др.), острая и хроническая лучевая болезнь, диабет
Метан (CH ₄)	Расстройства желудочно-кишечного тракта (мальабсорбция углеводов)
CS ₂ и пентан	Фактор риска при заболеваниях коронарных артерий, шизофрении
Этилен (C ₂ H ₄)	Окислительный стресс, перекисное окисление липидов внутренних органов, острый инфаркт миокарда, разрушения, вызываемые свободными радикалами
Этан (C ₂ H ₆) и пентан	Перекисное окисление липидов при пересадке печени, маркер перекисного окисления липидов, шизофрения
Метанол	Заболевания центральной нервной системы
Этанол	Диабет

Ацетон C ₆ H ₆ O	Алкоголизм, функция поджелудочной железы при остром деструктивном панкреатите и диетическом разбалансе, тяжёлая сердечная недостаточность, рак лёгкого, диабет
Пентан и его производные	Рак груди, острый инфаркт миокарда, отторжение титрованного сердца, ревматоидный артрит, обострение бронхиальной астмы
Изотопические модификации CO ₂	Инфицирование бактерией <i>Helicobacter pylori</i> , прохождение пищи через желудочно-кишечный тракт, избыточный рост бактерий, дисфункции поджелудочной железы, усвоение лактозы, малабсорбция, дисфункция печени, в т.ч. цирроз, метаболизм желчи, метаболизм глюкозы
Пары мочи	Гастроэнтерология
Алканы (гексан и др.)	Рак лёгкого, туберкулез

Качественный прорыв в изучении состава ВВ был сделан только в начале XX в., когда стали применять масс-спектрографию (МС) и хроматографию. Возрождение хроматографии связано с именами английских ученых Арчера Мартина и Ричарда Синга, которые в 1941 г. разработали метод распределительной хроматографии, за что им в 1952 г. была присуждена Нобелевская премия в области химии [6]. С середины XX в. и до наших дней хроматография и масс-спектрография являются одними из наиболее широко применяемых аналитических методов для изучения ВВ. Этими методами в ВВ было определено около 400 летучих метаболитов, многие из которых используются как маркеры воспаления; определены их специфичность и чувствительность для диагностики многих заболеваний. Помимо хроматографии и масс-спектрографии применяются радиоиммунный и иммуноферментный анализы, спектрофотометрия, флюорометрический и хемилюминисцентный методы, изучаются протеиновая матрица и фактор некроза опухоли и т.п. В медицине при изучении газообмена для измерения концентрации углекислого газа, кислорода и азота во вдыхаемой и выдыхаемой газовой смеси для исследования газов крови и для измерения концентрации газа-индикатора в искусственно создаваемой смеси при определении ряда параметров дыхания используются газоанализаторы (приборы для измерения концентрации газа в газовой смеси). В последние годы в медицине используются ионные и протонные масс-спектроскопические методы и газовая хроматография, но такая аппаратура дорога и громоздка.

Предложены варианты использования полупроводниковых газовых сенсоров для детектирования выделяемых у больных концентраций детектируемого газа (например, ацетона при диабете). Определение концентрации химических соединений в ВВ с использованием газовых сенсоров позволит уже на ранних стадиях диагностировать заболевание и даст возможность контроля за лечением. ВВ помимо азота, кислорода и водяных паров содержит у больного человека различные газы. Только на лечение галитоза в США и Европе расходуются миллиарды долларов. По concentra-

ции ацетона и величине проходящего через полупроводниковый сенсор тока или электрического напряжения, например, можно судить о степени заболевания диабетом, об острой сердечной недостаточности, раке легкого; перекись водорода и окись азота указывают на астму и другие легочные заболевания, рак органов пищеварения; аммиак и сероводород – на гепатит и цирроз печени; водород и метан – на ряд заболеваний пищеварительной системы и др.

Разумеется, за рубежом начаты интенсивные работы по созданию соответствующей новой малогабаритной аппаратуры с использованием полупроводниковых газовых сенсоров. Известные нам первые измерители ВВ очень дороги. Так, например, стоимость немецких измерителей концентрации окиси азота, углерода и алкоголя составляет 2.8 млн., 465 тыс. и 346 тыс. драмов, соответственно, что препятствует их массовому использованию в медицинских учреждениях и лабораториях. Стоимость одного сенсора ацетона, производимого в Китае, составляет 42 800 драмов, что значительно дороже стоимости соответствующего сенсора, разработанного в ЕГУ. Между тем заметим, что в Ереванском государственном университете (кафедра физики полупроводников и микроэлектроники и научный центр полупроводниковых приборов и наноэлектроники) в результате многолетних исследований разработаны полупроводниковые сенсоры различных газов [23-42]. Эти сенсоры чувствительны к парам ацетона, аммиака, окислов азота, изобутана, сероводорода, водорода, различных спиртов, толуола, горючих газов, пероксида водорода, пропана, пропилен гликоля, формальдегида, диметилформамида, дихлорэтана, газolina, угарного газа и к дыму, возникающему на ранних стадиях пожара. В рамках гранта НАТО разработаны малогабаритные полупроводниковые сенсоры нервно-паралитических газов химического оружия (зарина, иприта). Успешные испытания таких сенсоров проведены в Военной академии Чехии. Разумеется, есть информация и о коммерческих сенсорах газов (кроме сенсоров военных, ядовитых и ряда промышленных газов), выпускаемых в США, Японии, Китае, России и Германии. Но заметим, что сенсоры, разработанные в ЕГУ, стабильны во времени, меньшего объема, значительно дешевле их и легко совместимы с интегральными схемами. На рис. 1-3 показаны наши малогабаритные детекторы спиртов и водорода.



Рис. 1. Детектор газов на микроэлектронных схемах [41].



Рис. 2. Детектор водорода [23].



Рис. 3. Детектор газа на программируемой плате Arduino Nano.

На рис. 3 продемонстрирована возможность реализации такого детектора с использованием программируемой платы с собственным процессором и памятью Arduino Nano. На плате имеется пара десятков контактов, к которым можно подключить не только всевозможные компоненты: дисплеи, светодиодные лампы (LED), датчики, моторы, роутеры, магнитные замки и т.п., но и ряд химических газовых сенсоров, разработанных нами. В процессор Arduino можно загрузить программу, которая будет управлять всеми этими устройствами по заданному алгоритму, т.е. плату Arduino можно программировать. Плата Arduino обеспечивает расширяемость и возможность автоматизировать некоторые действия. Нами выбрана плата Arduino Nano. Это дает возможность реализации электронного носа, позволяющего детектировать несколько болезней. Примечательно, что в качестве газового датчика могут быть использованы как сенсоры, предложенные в центре полупроводниковых приборов и нанотехнологий ЕГУ, так и любые другие, например, китайские газовые датчики. Кроме платы Arduino и газового сенсора нам понадобились сигнализационная система, сервопривод, который будет имитировать клапан, и реле. Мы добавили также две кнопки – первую для включения и отключения системы, а вторую – для включения и отключения сервопривода. Всю систему питают шесть пальчиковых батареек или АС-ДС адаптер. На рис. 4 показан разработанный нами прибор, позволяющий измерять одновременно три газа – метан, угарный газ и водород [42].

На основе имеющихся в ЕГУ сенсоров нами уже разрабатываются тестеры нескольких заболеваний и газов для медицинского применения с использованием ВВ. В настоящее время ведутся работы по созданию приборов с дисплеями, показания степени заболевания которых должны быть тщательно установлены с участием и помощью медиков.

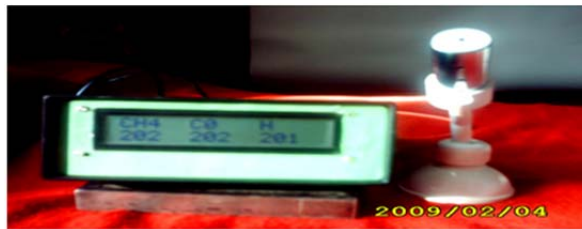


Рис. 4. Электронный нос.

Заключение. Создание малогабаритных электронных приборов с использованием достижений современной микроэлектроники, способных распознавать малые концентрации выдыхаемого воздуха, является в наше время одной из важнейших задач медицины, физики и электроники. Выше кратко изложены достижения, идеи и разработки в области современных малогабаритных приборов выдыхаемого воздуха. При выборе необходимых сенсоров и подключении к исследованиям медиков различных специальностей в краткие сроки можно провести необходимые опытно-конструкторские работы и организовать массовое производство в Армении соответствующей недорогой современной медицинской аппаратуры, позволяющей распознавать малые концентрации выдыхаемого воздуха.

Ереванский государственный университет
e-mail: kisahar@ysu.am

Академик В. М. Арутюнян

Медицинская диагностика с использованием микроэлектронных полупроводниковых газовых сенсоров

Создание малогабаритных электронных приборов для медицинской диагностики с использованием достижений современной микроэлектроники в области создания полупроводниковых газовых сенсоров, способных распознавать малые концентрации выдыхаемого воздуха, является в наше время одной из важнейших задач медицины, физики и электроники. В работе кратко изложены достижения и идеи проведения анализа выдыхаемого воздуха и соответствующие разработки в области современных малогабаритных приборов для такого анализа. В ЕГУ разработан и всесторонне исследован целый ряд таких сенсоров. При их выборе и подключении к исследованиям медиков различных специальностей в краткие сроки можно провести соответствующие опытно-конструкторские работы.

Ակադեմիկոս Վ. Մ. Հարությունյան

**Բժշկական ախտորոշում միկրոէլեկտրոնային
կիսահաղորդչային գազային սենսորներով**

Բժշկական ախտորոշման համար փոքրածավալ էլեկտրոնային սարքերի ստեղծումը, օգտագործելով ժամանակակից միկրոէլեկտրոնիկայի ձեռքբերումները կիսահաղորդչային գազային սենսորների ստեղծման բնագավառում, որոնք կարող են ճա-

նաչել արտաշնչվող օդի փոքր կոնցենտրացիաները, ժամանակակից բժշկության, ֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի կարևորագույն խնդիրներից մեկն է: Աշխատանքում ամփոփված են հիվանդների կողմից արտաշնչված օդի վերլուծության ձեռքբերումներն ու գաղափարները և համապատասխան զարգացումները նման վերլուծության համար ժամանակակից փոքրածավալ սարքերի ոլորտում: ԵՊՀ-ում մշակվել և համակողմանիորեն ուսումնասիրվել են նման սենսորների մի շարք տեսակներ, որոնք ընտրելիս և տարբեր մասնագիտությունների բժիշկների հետազոտություններին կարճ ժամանակում հնարավոր կլինի իրականացնել համապատասխան փորձակոնստրուկտորական աշխատանք:

Academician V. M. Aroutiounian

Medical Diagnostics Using Microelectronic Semiconductor Gas Sensors

Creation of small-sized electronic devices for medical diagnostics using the achievements of modern microelectronics in the field of semiconductor gas sensors capable of recognizing small concentrations of exhaled air is one of the most important tasks of modern medicine, physics and electronics. The paper summarizes the achievements and ideas of the analysis of exhaled air and the corresponding developments in the field of modern small-sized devices for such analysis. A number of such sensors have been developed and comprehensively studied at YSU. It is possible to carry out the relevant research and development work in a short time choosing and connecting to the research of physicians of various specialties.

Литература

1. *Лавуазье А.* <http://www.krugosvet.ru/enc/naukaiJehnika/himiya/LAVUAZEANTUANLORAN.html>.
2. *Степанов Е. В.* – Тр. Ин-та общей физики РАН. 2005. С. 5-46.
3. *Лукаш С. И.* – Компьютерные системы (Украина). 2010. № 9. С. 62-71.
4. *Pal R. B., Gurung A., Bhutia S. D. et al.* – Asian Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences. 2013. № 3. P. 1-5.
5. *Dweik R. A., Amann A.* – J. Breath Res. 2008. № 2. P. 11.
6. *Климанов И. А.* – Пульмонология. 2009. № 2. С. 113-119.
7. *Агейкин А. В., Пронин И. А.* – Молодой ученый. 2014. № 12. С. 383-384.
8. *Nagaraja C., Shashibhushan B. L., Asif M. et al.* – Lung India. 2012. V. 29(2). P. 123-127.
9. *Narjinary M. Sen P., Pal M.* – Materials and Design. 2017. V. 115. P. 158-164.
10. *Thati A., Biswas A., Roy Sh. et al.* – Int. Journal smart sensing intelligent systems. 2015. V. 8(2). P. 1244-1260.
11. *Saasa V., Malwela T., Beukes M. et al.* – Diagnostics. 2018. 8. P.12-29.
12. *Lin T., Lv X., Hu Z. et al.* – Sensors. 2019. V. 19. P. 233-265.
13. *Di Natale C., Paolesse R., Martinelli E., Capuano R.* – Analytica Chimica Acta. 2014. V. 824. P. 1-17.
14. *Romero-Ben E.* – Int. Journal of Nanomedicine. 2019. V. 4. P. 3245-3263.
15. *Ghoshal S., Mitra D., Roy S.* – Sensors and Transducers J. 2010. V. 113(2). P. 1-17.
16. *Hill D., Binions R.* – Int. Journal smart sensing intelligent systems. 2012. V. 5(2). P. 401-440.
17. *Nasiri N. I., Clarke C.* – Sensors. 2019. V. 19. P. 462-478.

18. *Cao F., Li C., Li M. et al.* – Micro and Nano Letters. 2018. V. 13(6). P. 779-783.
19. *Gonzales W. V., Mobashsher A. T., Abbosh A.* – Sensors. 2019. V. 19. P. 800-845.
20. *Kien N., Hung C. M., Ngoc T. M. et al.* – Sensors and Actuators. 2017. B253. P.156-163.
21. *Güntner A. T., Righettoni M., Sotiris P. E.* – Sensors and Actuators. 2016. B223. P. 266-273.
22. *Jornet N., Martíneza B., Cassi J. C. J. et al.* – Sensors & Actuators B. Chemical. 2019. V. 287. P. 380-389.
23. *Aroutiounian V. M.* – In: Dekker Encyclopedia of Nano-science and Nanotechnology, 2nd edn. 2012. Taylor and Francis. USA. P. 1-10.
24. *Aroutiounian V. M., Arakelyan V. M., Khachaturyan E. A. et al.* – Sensors and Actuators B. 2012. V. 173. P. 890-896.
25. *Aroutiounian V. M., Adamyan A. Z., Adamyan Z. N. et al.* – Sensors and Actuators B. 2013. V. 177. P. 308-315.
26. *Aroutiounian V. M.* – In: Semiconductor gas sensors, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. 2013. N 38. Chapter 12. P. 408-430.
27. *Aroutiounian V., Adamyan Z., Sayunts A. Khachaturyan E. et al.* – Int. Journal of Emerging Trends in Science and Technology (IJETST). 2014. 1(8). P. 1309-1319.
28. *Aroutiounian V. M., Arakelyan V. M., Shahnazaryan G. E. et al.* – Advances in Nano Research. 2015. 3(1). P. 1-11
29. *Aroutiounian V. M.* – Lithuanian J. of Physics. 2015. V. 55(4). P. 319–329.
30. *Aroutiounian V. M.* – In: Graphene Science Handbook. Applications and Industrialization. CRC Press Tailor&Francis Group, USA, FL., Boca Raton. 2016. Chapter 20. .P. 299-310.
31. *Aroutiounian V. M., Zakaryan H.* – Sensors and Transducers. 2017. V. 212(5). P. 50-56.
32. *Aroutiounian V., Arakelyan V., Aleksanyan M. et al.* – Sensors & Transducers. 2017. V. 213(6). P. 46-53.
33. *Aroutiounian V., Adamyan Z., Sayunts A. et al.* – Sensors & Transducers. 2017. V. 213(6). P. 38-45.
34. *Aroutiounian V. M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M. et al.* – Armenian Journal of Physics. 2017. V. 10(3). P. 122-127.
35. *Aroutiounian V. M.* – Sensors and Transducers. 2018. V. 223(7). P. 9-21.
36. *Aroutiounian V. M.* – International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2018. V. 249-251. № 36. P. 31-41.
37. *Aroutiounian V., Adamyan Z., Sayunts A. et al.* – Sens. Sens. Syst. 2018. V. 7. P. 31-41
38. *Aroutiounian V., Arakelyan V., Aleksanyan M. et al.* – Sens. Sens. Syst. 2018. V. 7. P. 281-288.
39. *Aroutiounian V., Adamyan Z., Sayunts A. et al.* – Sensors & Transducers. 2019. V. 229(1). P. 18-23.
40. *Aroutiounian V., Arakelyan V., Aleksanyan M. et al.* – Sensors and Transducers. 2019. V. 229(1). P. 24-31.
41. *Aroutiounian V., Kirakosyan V.* – Armenian Journal of Physics. 2018. V. 11(3). P. 160-165.
42. *Aroutiounian V., Pokhsranyan D., Chilingaryan H.* – Armenian Journal of Physics. 2010. V. 3(1). P. 78–81.

BIOCHEMISTRY

УДК 577.15+616-01/-09

G. A. Hovhannisyan, F. P. Sarukhanyan, O. V. Hunanyan,
N. H. Barkhudaryan

Changes in Catalase Activity Depending on Stages of
Gynecological Cancers

(Submitted by corresponding member of NAS RA E. S. Gevorgyan 15/VII 2019)

Keywords: *ovarian cancer, endometrial cancer, oxidative stress*

The female reproductive system is a complex multiorgan system which requires an optimal biological environment. Aerobic metabolism utilizing oxygen is essential for reproductive homeostasis and is associated with the generation of pro-oxidant molecules called ROS (reactive oxygen species) [1]. Many studies have investigated the presence of antioxidants and their transcripts in the female reproductive tract indicating that the balance between ROS and antioxidants greatly influences the reproductive activities, such as endometrial changes in different luteal phases, folliculogenesis, ovulation, fertilization, placental growth, embryogenesis, and implantation [2]. Thus, antioxidants are critical for maintaining the redox balance in the reproductive tract to support normal reproductive function [2].

Catalase (CAT, EC 1.11.1.6) plays a critical role in ROS metabolism. For this reason, it has been intensely studied in recent years [1-3]. Despite this, changes in CAT level during carcinogenesis, the mechanism of these changes, and their significance for course of the disease are still incompletely understood. CAT is frequently downregulated in human and rodent tumor tissues compared to normal tissues [4]. The low levels of CAT expression correlate with a high production of H_2O_2 , which is involved in the activation of signaling pathways to induce proliferation, migration, and invasion in cancer cells [4]. However, increased catalase expression has been observed in tumors from patients with gastric carcinoma, skin cancer, and chronic myeloid leukemia and in human HL-60 cancer cells rendered resistant to chronic exposure to H_2O_2 [4]. In studies with ovarian carcinoma low levels of tumor CAT activities were observed in tumor tissue [5-6] and in blood samples [7-9], whereas Gorozhanskaia et al. [10] measured high CAT activities in ovarian cancer patients compared with control. Very recently, it was reported about decreased CAT level in tissue

samples of the patients with uterine adenocarcinoma [3]. Thus, additional studies required to understand the controversial data about CAT activity in cancer pathophysiology.

We hypothesized that such changes in CAT activity in pathophysiology of malignant tumors may be not only organ-specific, but also depend on the stage of the disease and the patient's age. Therefore, in present study we have considered advisable to investigate the changes in CAT activity in plasma and tumor tissue samples of the patients with primary ovarian and endometrial cancer depending on the stage of disease and the age of patients.

Material and methods. The blood and tissue samples from postoperative material of untreated patients with the I (n=6), II (n=7) and III (n=5) stages of primary ovarian cancer and I (n=13), II (n=6) and III (n=5) stages of primary uterine adenocarcinoma were provided by the National Centre of Oncology (NCO MH RA). The plasma of healthy donors (n=6) and histologically checked healthy parts of remote tissue (n=8 for uterine and n=4 for ovaries) were used as a control. Histological study of the postoperative material was conducted by the Laboratory of Clinical Pathomorphology at the NCO MH RA. The most cases of ovarian cancer were diagnosed as a moderately and poorly differentiated adenocarcinoma. Age of patients ranged from 45-80, and the average age was 61 years. In case of uterine carcinoma, moderately differentiated endometrioid adenocarcinoma was diagnosed mostly. Age of patients ranged from 35-76, and the average age was 61 years as well.

Blood (1.5-2 ml) was collected into sodium citrate (3.2%)-coated vacutainer tubes and centrifugated at 1500 rpm for 10 min. Plasma was separated and stored at -32°C. Tissue samples were homogenized with 5 volumes of 50 mM Tris-HCl, pH 7.5 buffer, containing 0.05% Triton-X-100, 0.1 mM EDTA, 1 mM dithiothreitol (DTT), protease inhibitors, and centrifugated at 20000×g for 60 min at 4°C. The supernatant was separated and stored at -32°C as well. The protein content in samples was determined by Bradford assay [11].

The activity of catalase was studied using the spectrophotometric assay of hydrogen peroxide based on formation of its stable complex with ammonium molybdate [12].

Experiments were performed at least three times. The results were expressed as the means ± SEM. Statistical analysis was performed using Origin 6.1 software. Statistical significance was defined at $P < 0.05$ and was determined with one-way ANOVA.

Results and discussion. Data obtained demonstrates that catalase activity in both plasma (Fig. 1a) and tissue samples (Fig. 1b) of patients with ovarian cancer were changed in a parallel manner showing a modest increase (1.23 fold and 1.58 fold, respectively) in the I stage of disease compared with the control groups. In the II and III stages of disease CAT activity was shown to be increased 1.1 and 1.97 fold in plasma, and 1.36 and 2.24 fold in tumor tissue, respectively compared with the I stage of disease. It must be noted that the changes in CAT activity in plasma of patients with ovarian cancer depending on stage of disease were not statistically significant.

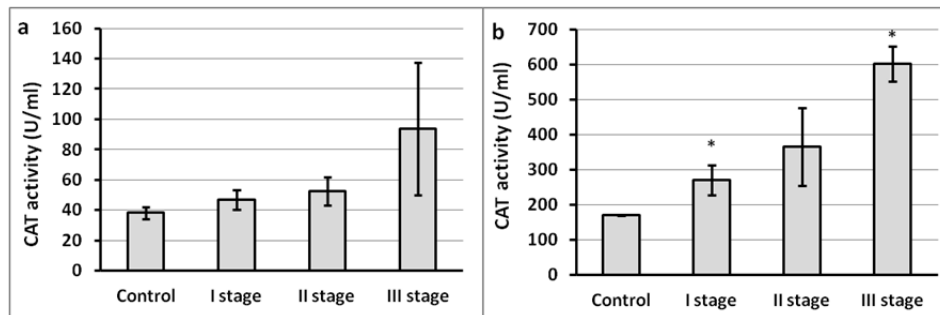


Fig. 1. Catalase activity in plasma (a) and tumor tissue (b) of the primary ovarian cancer patients with the I, II and III stages of disease. * $p < 0,05$ for the I stage compared with control, and for the III stage compared with the I stage (using one-way ANOVA).

In plasma of the patients with uterine cancer CAT activity demonstrates 6 fold increase in the I stage of disease compared with control group, and 4.3 and 3.6 fold decrease in the II and III stages of disease, respectively, compared with the I stage (Fig. 2a). However, CAT activity in tumor tissue demonstrates 6.3 fold increase in the I stage of disease compared with control group, 1.7 fold increase in the II stage of disease compared with the I stage and dramatic 8.3 fold decrease in the III stage of disease compared with the I stage (Fig.2b).

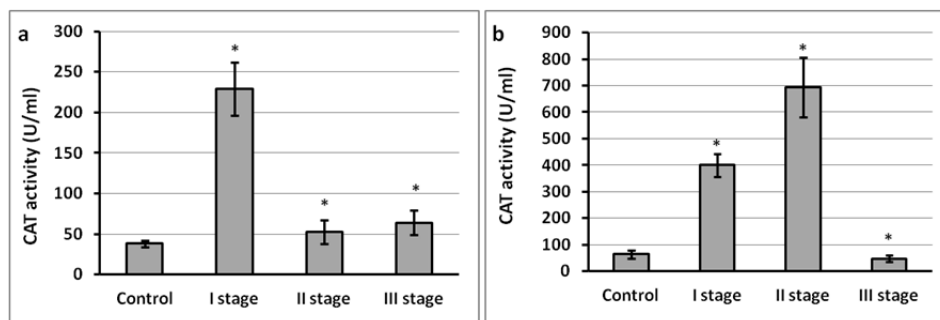


Fig. 2. Catalase activity in plasma (a) and tumor tissue (b) of the primary uterine cancer patients with the I, II and III stages of disease. * $p < 0,05$ for the I stage compared with control, and for the II and III stages compared with the I stage (using one-way ANOVA).

Tumors undergo metabolic reprogramming to meet the increased energetic and anabolic demands [13]. Thus, most malignant tumor cells likely have high cell metabolic activity and, thereby may have high oxidant generation. As oxidative stress is a primary stimulus for the induction of antioxidative enzymes, their induction most commonly remains insufficient in response to enhanced oxidative stress and can reduce but not fully compensate the oxidative stress. The imbalance reveals a slightly pro-oxidant state and over a time creates a tumor

supportive oxidant environment in which tumor suppressor elements are downregulated, and tumor cells show enhanced proliferation and are more aggressive [14]. In this regard, gradually increased antioxidative enzyme levels, such as CAT activity in ovarian cancer, could be the reflection of cancer cells adaptation to exacerbating oxidative stress.

It was reported that activity of CAT in I stage uterine adenocarcinoma patients was significantly decreased compared to women with polyps or myoma [3]. The difference between that results and our data maybe because of different control groups. Furthermore, Punnonen et al. [15] found that Japanese women with endometrial cancer did not have significantly altered CAT activity. This means that perhaps changes in CAT activity in the same pathology may depend on nationality, that is genom, as well. Previously, the difference in the transcriptional regulation of catalase expression has been shown in normal versus cancer cells [4]. Although the precise mechanism of CAT regulation during the development of uterine malignancy remains unknown, the absence of a positive correlation between its activity and level [3] is suggesting that CAT activity in endometrial tissue is governed by a mechanism other than expression.

The low levels of CAT in the plasma of endometrial cancer patients with the II and III stages of disease may be due to their increased utilization to scavenge lipid peroxides as well as their sequestration by tumor cells and most probably would enhance the oxidative stress in patients by lowering the detoxification of H_2O_2 [16]. It is already known that if the O^{2-} is not removed immediately, it may cause the inhibition of CAT activity [17]. Thus, the lower CAT activity we have found might be a consequence of the decreased SOD activity reported in patients with endometrial cancer [16]. It is possible that such relations contribute to a certain antiapoptotic milieu that is suitable for enhancing the mutations frequency, a condition which may lead to the cell transformation and cancer. Investigations already point to that mechanism [18].

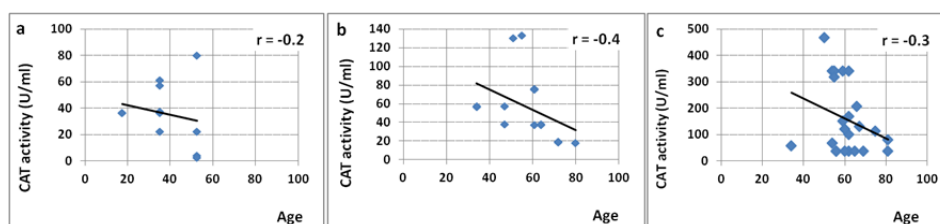


Fig. 3. Scatter plots of the plasma CAT activity against the age of the healthy donors (a; $p < 0.05$), primary ovarian (b; $p < 0.05$) and uterine (c; $p < 0.05$) cancer patients.

We have also study the age dependent changes in CAT activity in plasma and tumor tissue of the patients with ovarian and endometrial cancer. Interestingly, we have found weak negative correlation between CAT activity and the age of patients only in plasma ($r = -0.4$ for ovarian and $r = -0.3$ for uterine cancer) (Fig. 3b, c), but not in tumor tissue ($r = 0.07$ for ovarian and $r = 0.001$ for uterine

cancer) samples. As we have demonstrated that CAT activity in plasma changes depending on the age of the healthy donors as well ($r=-0.2$; Fig. 3a), it means that it is a characteristic feature of catalase activity to be changed with the age. Thus, we have concluded that changes in CAT activity do not depend on the age of patients with gynecological cancers.

Since endometrial carcinoma is usually divided into Type 1 and Type 2 tumors, we considered advisable to study also the changes in CAT activity depending on this division. Data obtained demonstrated that there were no statistical significant changes in CAT activity in plasma of oncologic patients with Type 1 and Type 2 tumors (151.7 ± 31.8 U/ml and 161.3 ± 40.9 U/ml, respectively). However, in tumor tissue we have found statistically significant changes in CAT activity depending on the type of tumor. It was shown to decrease in Type 2 tumor tissues (36 ± 4.4 U/ml) compared with the Type 1 tumor (315.1 ± 51.6 U/ml). Thus, in tumor tissue we have found weak correlation ($r = 0.4$) between CAT activity and type of tumor, which means that tumor type in endometrial adenocarcinoma affects CAT activity only locally in tumor, but not in circulation.

In summary, we have demonstrated that changes in CAT activity in gynecological cancers are organ-specific; depend on the stage of disease, but not on the age of patients, as well as, on the tumor type in tumor tissue of the patients with endometrial adenocarcinoma.

Acknowledgment. We thank to National Center of Oncology MH RA, particularly the Laboratory of Clinical Pathomorphology (head S. Davtyan), for the provided oncological samples.

H. Buniatian Institute of Biochemistry of NAS RA
e-mail: gayane90.30@gmail.com

**G. A. Hovhannisyan, F. P. Sarukhanyan, O. V. Hunanyan,
N. H. Barkhudaryan**

Changes in Catalase Activity Depending on Stages of Gynecological Cancers

The changes in catalase activity in plasma and tumor tissue samples of untreated patients with primary ovarian and endometrial cancers with the I, II and III stages have been studied. It was demonstrated for the first time that catalase activity in both ovarian and endometrial cancer changes depending on the stage of disease, but not on the age of patients. The changes in catalase activity in tumor tissue of the patients with endometrial cancer depend on the tumor type as well. Data obtained can be used for improving the main therapy strategies for the gynecological cancers treatment.

**Գ. Ա. Հովհաննիսյան, Ֆ. Պ. Սարուխանյան, Օ. Վ. Հունանյան,
Ն. Հ. Բարխուդարյան**

**Կատալազի ակտիվության փոփոխությունը գինեկոլոգիական
քաղցկեղի փուլերից կախված**

Ուսումնասիրվել են կատալազի ակտիվության փոփոխությունները բուժում չստացած և I, II, III փուլերում գտնվող ձվարանների ու էնդոմետրիումի առաջնային քաղցկեղով հիվանդների պլազմայում և ուռուցքային հյուսվածքում: Առաջին անգամ ցույց է տրվել, որ կատալազի ակտիվությունը ինչպես ձվարանների, այնպես էլ էնդոմետրիումի քաղցկեղի ժամանակ փոփոխվում է կախված հիվանդության փուլից, բայց ոչ հիվանդի տարիքից: Էնդոմետրիումի քաղցկեղով հիվանդների ուռուցքային հյուսվածքում կատալազի ակտիվությունը փոփոխվում է նաև ուռուցքի տեսակից կախված: Ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել գինեկոլոգիական քաղցկեղի բուժման հիմնական թերապևտիկ մոտեցումների բարելավման նպատակով:

Г. А. Оганнисян, Ф. П. Саруханян, О. В. Унанян, Н. А. Бархударян

**Изменения активности каталазы в зависимости от стадии
гинекологического рака**

Изучались изменения активности каталазы в плазме и опухолевой ткани ранее нелеченных пациентов с первичным раком яичников и эндометрия в I, II и III стадиях. Впервые показано, что активность каталазы как при раке яичников, так и эндометрия меняется в зависимости от стадии заболевания, но не от возраста больного. Изменения активности каталазы в опухолевой ткани у пациентов с раком эндометрия зависят также от типа опухоли. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения основных стратегий терапии при лечении гинекологических раковых заболеваний.

References

1. *Levente L., Dr. Volodymyr Lushchak (Ed.)—InTech. 2012. ISBN: 978-953-51-0552-7.*
2. *Wang Sh., He G., Chen M., Zuo T., Xu W., Liu X.— Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2017. doi.org/10.1155/2017/4371714.*
3. *Todorovi'c A. Peji'c S., Gavrilovi'c L., Pavlovi'c I., Stojiljkovi'c V. et al.— Antioxidants. 2019. V. 8 (97). doi:10.3390/antiox8040097.*
4. *Glorieux Ch., Zamocky M., Sandoval J. M., Verrax J., Calderon P. B.— Free Radical Biology and Medicine. 2015. V. 87. P. 84 - 97.*
5. *Falfushynska H. I., Gnatshyna L. L., Deneha H. V., Osadchuk O. Y., Stoliar O. B.—Ukr. Biochem. J., 2015. V. 87. P. 93–102.*
6. *Sanchez M., Torres J. V., Tormos C., Iradi A., Muniz P. et al.— Cancer Lett. 2006. V. 233. P. 28-35.*
7. *Senthil K., Aranganathan S., Nalini N.— Clin. Chim. Acta. 2004. V. 339. P. 27–32.*
8. *Manimaran A., Rajneesh C. P. — Acad. J. Cancer Res. 2009. V. 2. P. 68-72.*
9. *Bandeuche A., Melinkeri R. R.— Biomed. Res., 2011. V. 22. P. 196-200.*

10. Gorozhanskaia E. G., Davydova T. V., Zubrikhina G. N., Kormosh N. G., Laktionov K. P. – *Klin. Lab. Diag.*, 2003. V. 10. P. 41-44.
11. Bradford M.M. – *Anal. biochem.* 1976. V. 72. P. 248-254.
12. Goth L. – *Clinics Chimica Acta.* 1991. V. 196. P. 143-152.
13. Romero-Garcia S., Lopez-Gonzalez J. S., Báez-Viveros J. L., Aguilar-Cazares D., Prado-Garcia H. – An integral view. *Cancer Biology & Therapy.* 2011. V. 12 (11). P. 939-948.
14. Gào X., Schöttker B. – *Oncotarget.* 2017. V. 8. P. 51888-51906.
15. Punnonen R., Kudo R., Punnonen K., Hietanen E., Kuoppala T. et al. – *Eur J Cancer.* 1993. V. 29(A). P. 266-269.
16. Pejić S., Todorović A., Stojiljković V., Kasapović J., Pajović S. B. – *Reproductive Biology and Endocrinology.* 2009. V. 7(149). doi: 10.1186/1477-7827-7-149.
17. Lardinois O.M. – *Free Radic Res.* 1995. V. 22. P. 251-274.
18. Ho J.C., Chan-Yeung M., Ho S.P., Mak J.C., Ip M.S. et al. – *Eur Respir J.* 2007. V. 29. P. 273-278.

Член-корреспондент НАН РА Ж. А. Варданян, С. А. Ктракян

**Сравнительная оценка декоративности древесных
растений различного географического происхождения и
таксономических групп в зеленых насаждениях г. Еревана**

(Представлено 19/IV 2019)

Ключевые слова: *древесное растение, оценка декоративности, декоративные насаждения, таксономическая группа, солитер, вертикальное озеленение.*

Интенсивное озеленение г. Еревана было начато в 1950-х гг., когда были созданы различные декоративные насаждения в разных административных районах и микрорайонах столицы. Именно в эти годы стало развиваться бурное жилищное строительство – были построены новые жилые микрорайоны (Нор-Норк, Аван, Давиташен и др.). В связи с этим уже в конце 1960-х гг. зеленые насаждения, в которых состав деревьев и кустарников достиг примерно 200 видов, занимали в городе около 1200 га [1, 2]. Удовлетворительную акклиматизацию проявили не все испытанные виды деревьев и кустарников, большинство из них адаптировалось неудовлетворительно или не выдержало отрицательного воздействия дендроклиматических условий.

В последние 60 лет (1960-2018) в озеленении г. Еревана использовано свыше 250 видов древесных растений из 106 родов и 44 семейств. Среди них в настоящее время в зеленых насаждениях столицы встречается более 170 видов [3]. Наиболее хорошо акклиматизировалось около 85 видов различного географического происхождения и таксономической принадлежности, которые широко используются в различных типах и категориях декоративных насаждений. Около 20 видов являются представителями аборигенной дендрофлоры Армении.

Целью настоящей работы являлось проведение сравнительной оценки декоративности древесных растений различного географического происхождения и таксономических групп, широко применяемых в зеленых насаждениях г. Еревана.

В течение вегетационного периода нами проводились регулярные фе-

нологические наблюдения (2014-2018) для оценки как адаптационных возможностей и особенностей сезонного развития, так и декоративности древесных растений, в частности, продолжительности и обильности цветения и окраски цветков; обилия и окраски плодов; осенней окраски листьев и т.п. Следует отметить, что все перечисленные декоративные качества изменчивы в течение жизни и вегетационного сезона. При определении критериев по оценке декоративности древесных растений применялись методические указания, рекомендуемые Главным ботаническим садом РАН [4-6], а также научные работы отечественных ученых [7-8] и собственные методологические публикации [9-11].

При обобщении результатов исследования из 85 акклиматизированных нами растений выделены 64 высокодекоративных вида, включающие разновидности и садовые формы из 46 родов и 25 семейств, в числе которых 11 хвойных и 53 лиственных вида. Деревья составляют 34 вида, кустарники – 27, древесные лианы – всего лишь 3. Среди них 19 представителей аборигенной дендрофлоры (*Acer platanoides*, *Cotinus coggygia*, *Berberis vulgaris*, *Betula litwinowii*, *Philadelphus caucasicus*, *Fraxinus excelsior*, *Ligustrum vulgare*, *Sorbus aucuparia*, *Tilia caucasica* и др.). Исследуемый ассортимент характеризуется определенной декоративностью и представлен следующими группами древесных растений по их пригодности для применения в различных категориях зеленых насаждений и композиционных оформлений: в качестве солитеров, для групповых, а также уличных и аллеиных посадок, живых изгородей и бордюров, садов длительного цветения, вертикального озеленения и т.п. Подробные данные по оценке декоративности указанных групп древесных растений обобщены в табл. 1.

Согласно анализу дендросостава по оценке декоративности из 64 видов очень высокую оценку получили 28, высокую – 19, среднюю – 14 и лишь у 2-х видов оценка декоративности низкая. При этом наиболее высокая оценка (40 и больше баллов) у 3-х видов лиственных (*Albizzia julibrissin*, *Wisteria sinensis*, *Chaenomeles japonica*), а из хвойных высокую (26 и больше баллов) получили *Biota orientalis* f. *globosa*, *Juniperus virginiana*, *Thuja occidentalis* f. *fastigiata*.

По географическому происхождению картина древесных растений зеленых насаждений г. Еревана следующая: 23 вида (в том числе 19 аборигенных) кавказского происхождения; почти одинаково представлены евросибирские (13) и североамериканские (12) виды, а Восточная Азия занимает промежуточное положение (16 видов).

Согласно сравнительному анализу декоративности древесных растений из указанных географических регионов подавляющее большинство представителей дендрофлоры Северной Америки (*Thuja occidentalis* f. *fastigiata*, *Juniperus virginiana*, *Robinia pseudoacacia* f. *compacta*, *Picea pungens* f. *glauca*) и Восточной Азии (*Biota orientalis* f. *globosa*, *Sophora japonica*, *Wisteria sinensis*, *Chaenomeles japonica*, *Cotoneaster horizontalis*) имеет очень высокие оценки декоративности. Из кавказских и местных видов

высокой декоративностью отличаются *Cotinus coggygria*, *Viburnum lantana*, *V. opulus*, *Albizia julibrissin*, *Philadelphus caucasicus*, *Tilia caucasica* и др.

Таблица 1

**Оценка декоративности древесных растений, широко применяемых
в зеленых насаждениях г. Еревана**

Название вида (по семействам)	Жизненная форма	Ареал естественного распространения	Применение по типам озеленения					Сумма баллов по оценке декоративности	Степень декоративности	
			В качестве солитера	В уличных насаждениях	В групповых посадках	Живые изгороди	Вертикальное озеленение			
Aceraceae – Кленовые										
Acer planatanoides L. Клен остролистный или платановидный	Длп	Европа, Кавказ, Финляндия, Скандинавия	+	+	+	-	-	29	Средняя	
A. pseudoplatanus L. К. ложноплатановый, явор, белый клен	Длп	Кавказ, Зап. Европа, М. Азия	+	+		-	-	29	Средняя	
Anacardiaceae – Сумаховые										
Cotinus coggygria Scop. Скумпия кожевенная	Длп	Молдавия, Европа, Кавказ, Китай, Гималаи	+	-	+	-	-	37	Очень высокая	
Berberidaceae – Барбарисовые										
Berberis vulgaris L. Барбарис обыкновенный	Клп	Евразия	-	-	+	-	-	32	Высокая	
Betulaceae – Березовые										
Betula litwinowii Doluch. Береза Литвинова	Длп	Кавказ	+	+	+	-	-	29	Средняя	
B. pendula Roth Б. поникшая	Длп	Вост. Европа, Зап. Сибирь, Алтай, Кавказ	+	-	-	-	-	32	Высокая	
Bignoniaceae – Бигнониевые										
Campsis radicans (L.) Seem. Камписис укореняющийся	Ллп	Сев. Америка	-	-	-	-	+	34	Высокая	

Catalpa ovata G. Don Катальпа яйцевидная	Длп	Китай	+	+	+	-	-	34	Высокая
Вухасеае-Самшитовые									
Buxus sempervirens L. Самшит вечнозеленый	Клв	Сред-морье	-	+	+	+	-	23	Низкая
Сaprifoliaceae – Жимолостные									
Lonicera tatarica L. Жимолость татарская	Клп	Евразия	-	-	+	-	-	23	Низкая
Sambucus nigra L. Бузина черная	Клп	Юж. и Ср. Европа, Турция, Иран, Ирак, Сирия, Кавказ, Крым	+	-	+	-	-	33	Высокая
Symphoricarpos albus (L.) Blake Снежноягодник белый	Клп	Сев. Америка	-	-	+	+	-	26	Средняя
Weigela florida Sieb. Et Zucc Вейгела цветущая	Клп	Даль.Вос- ток, Сев. Китай, Корея	+	-	+	-	-	32	Высокая
Viburnum lantana L. Гордовина	Клп	Ср. и Юж. Европа, Кавказ, Мал. Азия	+	-	+	-	-	36	Очень высокая
V. opulus L. Калина обыкновенная	Клп	Кавказ, Ср. Азия, Сибирь, Мал. Азия, Европа	+	-	+	-	-	36	Очень высокая
Cornaceae – Дереновые									
Cornus alba L Дерен белый	Клп	Сев. Евразия	-	-	+	-	-	29	Средняя
Cupressaceae – Кипарисовые									
Biota orientalis (L.) Endl. Биота восточная	Дх	Сев. Китай	+	+	+	+	-	23	Очень высокая
B. orientalis f. globosa Endl. Б. восточная шаровидная	Дх	Китай, Корея, Маньчжу- рия	+	+	+	-	-	26	Очень высокая
Juniperus communis L. Можжевельник обыкновенный	Дх	Европа, Сев. Америка	+	-	+	-	-	23	Очень высокая

J. sabina L. М. казацкий	Кх	Вост. Европа, Крым, Кавказ, Южн. Урал, Казахстан, Сев. Монголия	+	-	+	-	-	23	Очень высокая
J. virginiana L. М. виргинский	Дх	Сев. Америка	+	+	+	-	-	27	Очень высокая
Thuja occidentalis L. Туя западная	Дх	Сев. Америка	+	+	+	-	-	24	Очень высокая
T. occidentalis f. fastigiata Jacq. Т. западная пирамидальная	Дх	Сев. Америка	+	+	+	-	-	26	Очень высокая
Fabaceae – Бобовые									
Albizia julibrissin Durazz. Альбиция ленкоранская или шелковая акация	Длп	Прикаспий- ская часть Талыша, Иран, Китай, Япония, Индия	+	+	+	-	-	40	Очень высокая
Caragana arborescens Lam. Карагана древовидная	Клп	Сибирь, Монголия	-	-	+	-	-	36	Очень высокая
Robinia pseudoacacia L. Робиния лжеакация, белая акация	Длп	Сев. Америка	+	+	+	-	-	36	Очень высокая
R. pseudoacacia f. compacta Hort. Р. лжеакация компактная	Длп	Сев. Америка	+	+	+	-	-	36	Очень высокая
Sophora japonica L. Софора японская	Длп	Китай, Япония	+	+	+	-	-	35	Высокая
Wisteria sinensis (Sims.) Sweet Вистерия китайская	Ллп	Китай	-	-	-	-	+	43	Очень высокая
Fagaceae – Буковые									
Quercus robur L. Дуб черешчатый или летний	Длп	Европа, Крым, Кавказ	+	+	+	-	-	29	Средняя
Hydrangeaceae – Гортензиевые									
Deutzia scarba Thunb. Дейция шершавая	Клп	Япония, Китай	+	-	+	-	-	30	Средняя
Philadelphus caucasicus Koehne Чубушник кавказский	Клп	Кавказ, М. Азия	+	-	+	+	-	36	Очень высокая

Liliaceae – Лилейные									
<i>Yucca filamentosa</i> L. Юкка нитчатая	Клв	Сев. Америка	-	-	+	-	-	33	Высокая
Loganiaceae – Логаниевые									
<i>Buddleia davidii</i> Franch. Буддлея Давида	Клп	Китай	+	-	+	-	-	26	Средняя
Malvaceae-Мальвовые									
<i>Hibiscus syriacus</i> L. Гибискус сирийский	Клп	Китай, Индия, М. Азия	+	+	+	-	-	33	Высокая
Oleaceae – Маслинные									
<i>Forsythia intermedia</i> Zab. Форзиция промежуточная	Клп	В культуре	+	-	+	+	-	33	Высокая
<i>Fraxinus excelsior</i> L. Ясень обыкновенный	Длп	Евразия	+	+	+	-	-	29	Средняя
<i>F. pennsylvanica</i> Marsh. Я. пенсильванский	Длп	Сев. Америка	+	+	+	-	-	29	Средняя
<i>Ligustrum vulgare</i> L. Бирючина обыкновенная	Клп	Центр. Европа	-	-	+	+	-	33	Высокая
<i>Syringa vulgaris</i> L. Сирень обыкновенная	Клп	Центр. Европа	+	+	+	-	-	33	Высокая
Pinaceae – Сосновые									
<i>Picea abies</i> (L.) Karst. Ель обыкновенная	Дх	Альпы, Карпаты, Скандина- вия, Южн. Урал	+	+	+	-	-	23	Очень высокая
<i>P. pungens</i> f. <i>glauca</i> Beissn Е. колючая сизая	Дх	Сев. Америка	+	+	+	-	-	26	Очень высокая
<i>Pinus nigra</i> Arnold ssp. <i>pallasiana</i> D. Don Сосна черная, крымская	Дх	Ср. и Южн. Европа, Австрия, Крым	+	+	+	-	-	24	Очень высокая
<i>P. sylvestris</i> L. С. обыкновенная	Дх	Европа, Сибирь	+	+	+	-	-	24	Очень высокая
Platanaceae – Платановые									
<i>Platanus acerifolia</i> Wild. Платан кленолистный	Длп	М. Азия, Южн. Италия	+	+	+	-	-	32	Высокая

P. orientalis L. П. восточный	Длп	Балк. п-ов, М. Азия, Средизем. о-ва Кипр и Крит, Кавказ	+	+	+	-	-	32	Высокая
Rosaceae – Розоцветные									
Chaenomeles japonica (Thunb.) Lindl. ex Spach Хеномелес японский	Клп	Китай	+	-	+	-	-	42	Очень высокая
Cotoneaster horizontalis Desne Кизильник горизонтальный	Клп	Центр. Китай	+	-	+	-	-	36	Очень высокая
Crataegus macracantha Lodd. Ex Loud Боярышник крупноколючковый	Длп	Сев. Америка	+	+	+	+	-	36	Очень высокая
Radus avium Mill. Черемуха обыкновенная или кистевая	Длп	Европа, Кавказ, Турция, Афганис- тан, Гималаи	+	+	+	-	-	38	Очень высокая
Sorbus aucuparia L. Рябина обыкновенная	Длп	Европа, Крым, Кавказ, М. Азия, Сев. Африка	+	+	+	-	-	35	Высокая
Spiraea x vanhouttei (Briot) Zab Таволга Вангутта	Клп	В культуре (гибрид)	+	+	+	+	-	34	Высокая
Salicaceae – Ивовые									
Populus bolleana Launche Тополь Болле	Длп	Ср. Азия	+	+	+	-	-	35	Высокая
P. deltoides Marsh. Т. дельтовидный или канадский	Длп	Сев. Америка	+	+	+	-	-	29	Средняя
P. gracilis Grossh. Т. грациозный	Длп	Кавказ, Ср. Азия, Иран, Сред-морье	-	+	-	-	-	33	Высокая
Salix alba L. Ива белая	Длп	Евразия	+	+	+	-	-		Высокая
S. alba f. pendula Hort И. белая плакучая	Длп	Евразия	+	+	+	-	-		Очень высокая

Sapindaceae – Сапиндовые									
Koelreuteria paniculata Laxm. Кельрейтерия метельчатая	Длп	Китай, Корея, Япония	+	+	+	-	-	37	Очень высокая
Tiliaceae – Липовые									
Tilia saucasica Rupr. Липа кавказская	Длп	Крым, Кавказ, Сев. Иран, М. Азия	+	+	+	-	-	37	Очень высокая
T. cordata Mill Л. мелколистная, сердцевидная	Длп	Европа, Крым, Кавказ, Урал, Зап. Сибирь	+	+	+	-	-	37	Очень высокая
Ulmaceae – Ильмовые									
Ulmus densa Letw. Вяз густой	Длп	Ср. Азия	+	+	-	-	-	29	Средняя
U. laevis Pall. В. гладкий	Длп	Европа, Крым, Кавказ	+	+	-	-	-	29	Средняя
U. pinnato-ramosa Dieck. В. перистоветвистый	Длп	Ср. Азия	+	+	+	-	-	29	Средняя
Vitaceae – Виноградовые									
Parthenocissus quinquefolia (L.) Planch Девичий виноград пятилисточковый	Ллп	Сев. Америка	-	-	-	-	+	35	Высокая

Примечание: Длп – дерево листопадное; Клп – кустарник листопадный; Ллп – лиана листопадная; Клв – кустарник лиственный вечнозеленый; Дх – дерево хвойное; Кх – кустарник хвойный.

Таксономическим анализом выявлено, что наиболее высокая декоративность характерна для представителей семейств Anacardiaceae (Cotinus), Cupressaceae (роды Biota, Thuja, Juniperus), Fabaceae (Albizia, Robinia, Sophora), Rosaceae (Chaenomeles, Cotoneaster, Sorbus, Spiraea). Высокую оценку получили представители семейств Berberidaceae (Berberis), Bignoniaceae (Campsis, Catalpa), Malvaceae (Hibiscus), Oleaceae (Forsythia, Ligustrum, Syringa), Platanaceae (Platanus), Salicaceae (Populus, Salix).

Нами проведен также анализ по использованию дендрологического состава по типам и категориям декоративных насаждений. Картина следующая: подавляющее большинство деревьев и кустарников (около 50 видов) применяются в качестве солитера. К ним относятся представители родов Acer, Betula, Biota, Thuja, Juniperus, Albizzia, Robinia, Sophora, Quercus, Picea, Pinus, Platanus, Sorbus, Salix и Tilia. Большинство из них широко применяется как в уличных и аллеиных, так и групповых посадках (табл. 1). В вертикальном озеленении широко используются всего лишь 3

вида древесных лиан: *Campsis radicans*, *Wisteria sinensis*, *Parthenocissus quinquefolia*. И наконец, около 10 видов встречаются в оформлениях жилых изгородей: *Buxus sempervirens*, *Symphoricarpos albus*, *Biota orientalis*, *Philadelphus caucasicus*, *Ligustrum vulgare*, *Spiraea vanhouttei* и др.

Проведенный нами анализ показывает, что в различных типах и категориях зеленых насаждений г. Еревана широко применяются приведенные в табл. 1 64 вида древесных растений. Около 100 видов встречаются в озеленении города редко или единичными экземплярами. Фенологические наблюдения над этими видами создают возможность в дальнейшем целенаправленно и широкомасштабно использовать также другие, еще не полноценно включенные в практику озеленения города виды древесных растений.

Институт ботаники им. А. Тахтаджяна НАН РА

**Член-корреспондент НАН РА Ж. А. Варданян,
С. А. Ктракян**

**Сравнительная оценка декоративности древесных растений
различного географического происхождения и таксономических
групп в зеленых насаждениях г. Еревана**

Обсуждаются вопросы оценки декоративности деревьев и кустарников 64-х видов, принадлежащих 46 родам и 25 семействам, широко используемых в зеленых насаждениях города Еревана. Выявлены сравнительные показатели декоративности и пригодности для деревьев различного географического происхождения и таксономических групп, широко используемых в практике озеленения столицы.

**ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Ժ. Հ. Վարդանյան,
Ս. Ա. Կտրակյան**

**Տարբեր աշխարհագրական ծագման և տաքսոնոմիական խմբերի
ծառաբույսերի գեղագարդության համեմատական գնահատականը Երևան
քաղաքի կանաչ տնկարկներում**

Քննարկվում են Երևան քաղաքի կանաչ տնկարկներում լայնորեն օգտագործվող 25 ընտանիքի և 46 ցեղի պատկանող 64 տեսակի ծառերի և թփերի գեղագարդության գնահատման հարցեր: Բացահայտված են մայրաքաղաքի կանաչապատման պրակտիկայում լայնորեն օգտագործվող տարբեր աշխարհագրական ծագման և տաքսոնոմիական խմբերի պատկանող ծառաբույսերի համեմատական գեղագարդության ցուցանիշները և պիտանիությունը:

**Corresponding member of the NAS RA Zh. H. Vardanyan,
S. A. Ktrakyan**

**Comparative Assessment of Decorativity of the Woody Plants of Various
Geographic Origin and Taxonomic Groups in Green Stands of Yerevan**

The article is devoted to evaluation of the decorativity of the woody plants of 64 species belonging to the 25 families and 46 genera, which are extensively used in green stands of Yerevan. The comparative characteristics and decorative suitability is revealed for the woody plants of various geographical origin and taxonomic groups, used in the practice of landscape gardening in the capital of Armenia.

Литература

1. Арутюнян Л. В. – Бюл. Бот. сада АН АрмССР. 1961. № 18. С. 5-33.
2. Варданыан Ж. А., Григорян А. А. В кн.: Матер, междунар. научн. конф. “Проблемы современной дендрологии”. М. ГБС РАН. 2009. С. 431-433.
3. Ктракян С. А. – Биол. журн. Армении. 2019. Т. 71. № 2. С. 43-47.
4. Лапин П. И., Сиднева С. В. В кн.: Опыт интродукции древесных растений. М. ГБС АН СССР. 1973. С. 7-67.
5. Колесников А. И. Декоративная дендрология. М. Лесная промышленность. 1974. 28 с.
6. Александрова М. С., Булыгин Н. Е., Ворошилов В. Н. и др. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. М. ГБС АН СССР. 1975. 28 с.
7. Арутюнян Л. В. – Биол. журн. Армении. 1966. Т. 19. № 5. С. 81-95.
8. Арутюнян Л. В., Саядян Л. Е., Мишнев Г. Ф. – Биол. журн. Армении. 1967. Т. 29. № 7. С. 43-51.
9. Варданыан Ж. А. Научные основы интродукции древесных растений в Армении. Ереван. Гитутюн. 2012. 400 с.
10. Варданыан Ж. А., Мурадян Н. Н., Григорян М. М., Гатрчян Г. М. – Биол. журн. Армении. 2016. Т. 68. № 4. С. 22-30.
11. Варданыан Ж. А. – ДНАН РА. 2017. Т. 117. № 4. С. 340-349.

Կանոններ հեղինակների համար

1. «Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի Զեկույցներ» հանդեսը լույս է տեսնում տարեկան չորս անգամ, գետեղում է գիտական հետազոտությունների նոր, ոչ մի տեղ չիրապարակված արդյունքներ պարունակող համառոտ, յուրօրինակ հոդվածներ:
2. ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոսները, թղթակից անդամները և արտասահմանյան անդամները իրենց հոդվածները ներկայացնում են անմիջականորեն: Մյուս բոլոր հոդվածները ներկայացվում են ՀՀ ԳԱԱ անդամների միջոցով:
3. Հոդվածները կարելի է ներկայացնել հայերեն, ռուսերեն կամ անգլերեն լեզվով: Այդ երեք լեզվով պետք է ներկայացնել նաև ռեֆերատ:
4. Ներկայացվում է հոդվածի էլեկտրոնային տարբերակը (CD/DVD-ով կամ e-mail-ով՝ mas@sci.am) երկու տպագիր օրինակով՝ վերջնական խմբագրությամբ: Հոդվածի ընդհանուր ծավալը՝ 8 էջ (12000 նիշ): Օգտագործվող տեքստային խմբագիրը՝ MS Word, տառաչափը՝ 12 pt, տողերի միջև հեռավորությունը՝ 1.5: Նկարները ներկայացվում են առանձին ֆայլով bmp կամ wmf ֆորմատով:

Հանդեսի համառոտ անունը՝

ՀՀ ԳԱԱԶ

Правила для авторов

1. «Доклады Национальной академии наук Армении» выходят 4 раза в год и помещают краткие оригинальные статьи, содержащие новые, нигде не опубликованные результаты научных исследований.
2. Академики, члены-корреспонденты и иностранные члены НАН РА представляют свои статьи непосредственно, все остальные статьи представляются через членов НАН РА.
3. Статьи могут быть представлены на армянском, русском или английском языках; должны быть представлены также рефераты на этих трех языках.
4. Представляется электронный вариант статьи (на CD/DVD или по e-mail: mas@sci.am) с двумя распечатками в окончательной редакции. Общий объем статьи не должен превышать 8 стр. (12000 знаков). Используемый текстовый редактор MS Word, кегль 12 pt, интервал 1.5.
- 1.5. Рисунки представляются отдельными файлами в формате bmp или wmf.

Сокращенное название журнала

ДНАН РА

Guidelines for Authors

1. "The Reports of the National Academy of Sciences of Armenia" are published four times a year and place brief original articles containing new results of scientific researches, which were not printed previously.
2. Academicians, Corresponding Members and foreign members of NAS RA submit their articles directly. All other articles are submitted through the Members of NAS RA.
3. Articles may be presented in Armenian, Russian or English languages. It must have been presented the abstracts in these three languages as well.
4. It should be presented the complete editing of the electronic variant of the article (CD/DVD or by e-mail: mas@sci.am) and two hard copies. The whole size of the article should not exceed 8 pages (12000 marks). MS Word would be used as a text editors, font size – 12 pt, line spacing – 1.5.
- 1.5. Pictures should be presented by the separate files in bmp or wmf formats.

The abbreviated name of the journal is
RNAS RA