

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

ISSN 0321-1339

ՉԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ
REPORTS

Համար
Том
Volume

122

№ 3

Երևան

Երևան

Yerevan

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ

ՋԵԿՈՒՅՑՆԵՐ

ՀԱՏՈՐ 122

№ 3

ՀՀ ԳԱԱ «ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ» ՀՐԱՏԱՐԱԿԶՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆ 2022

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF ARMENIA

ДОКЛАДЫ REPORTS

ТОМ 122
VOLUME

№ 3

ИЗДАТЕЛЬСТВО "ТИТУТЮН" НАН РА
ЕРЕВАН 2022

Հիմնադրվել է 1944 թ.: Լույս է տեսնում տարին 4 անգամ
Основан в 1944 г. Выходит 4 раза в год
Founded in 1944. Published quarterly

Գլխավոր խմբագիր՝ ակադեմիկոս Ռ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

Խմբագրական խորհուրդ՝ ակադեմիկոս Գ. Ե. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, ակադեմիկոս Վ. Ս. ԶԱԲԱՐՅԱՆ, 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. ՇՈՒԹՈՒՐՅԱՆ, ակադեմիկոս Յու. Մ. ՍՈՒՎԱՐՅԱՆ, Գ.Ա.ԱԲՐԱՎԱՄՅԱՆ (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 Ю. М. СУВАРЯН, 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. AROUTIOUNIAN, academician G. E. BAGDASARIAN, academician E. M. KAZARYAN, corresponding member of NAS RA L. R. MANVELYAN (associate editor), academician Yu. H. SHOUKOURIAN, academician Yu. M. SUVARYAN, academician L. A. TAVADYAN, academician V. S. ZAKARYAN, G. A. ABRAHAMYAN (executive secretary)

Խմբագրության հասցեն՝ 0019, Երևան 19, Մարշալ Բաղրամյան պող. 24գ

Адрес редакции: 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:* rmas@sci.am

© НАН РА. Президиум. 2022

© Издательство “Гитутюн”

НАН РА. 2022

Հայաստանի ԳԱԱ Ձեկույցներ

Հատոր 122, N 3, 2022

Հրատ. պատվեր N 1186

Խմբագրումը և սրբագրումը՝
Ա.Ապիյան, Ա. Սահակյան

Համակարգչային էջադրումը՝ *Վ. Պասյանի*

Ստորագրված է տպագրության
13.09.2022

Ծավալը՝ 5.25 տպ. մամուլ: Տպաքանակը՝ 150: Գինը՝ պայմանագրային:

Հ Հ ԳԱԱ «Գիտություն» հրատարակչության տպարան
Երևան, Մարշալ Բաղրամյան պող. 24

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱ

<i>Վ. Կ. Լեոնտիև, Ղ. Լ. Մովսիսյան, Ժ. Գ. Մարգարյան</i> – Գնդեր բուլյան տարածությունում	175
--	-----

ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱ

<i>Ա. Ա. Չուբարյան</i> – Արտածումների բարդությունների հարաբերությունները Ֆրեդեի համակարգերի, խորքային արտածման կանոններով KS և eKS համակարգերի միջև	182
---	-----

ՄԵԽԱՆԻԿԱ

<i>Հ. Գ. Շեկյան, Ա. Վ. Գևորգյան</i> – Լարումների կոնցենտրատորներով մեքենաների կառուցվածքային տարրերի ծավալային ամրության և աշխատունակության չափանիշները	188
<i>Ս. Հ. Մարգարյան</i> – Գրաֆենի շերտի ստատիկ լայնական ծռման և կայունության կիրառական խնդիրները	196

ԵՐԿՐԱՖԻԶԻԿԱ

<i>Ջ. Կ. Կարապետյան, Ա. Ս. Գասպարյան, Ս. Ռ. Շահպարտյան, Գ. Ս. Մաթևոսյան, Ռ. Կ. Կարապետյան, Հ. Ս. Շահպարտյան</i> – Սեյսմիկ տվիչ մշտադիտարկման համակարգերի համար: Մշակում և արդյունքներ	207
---	-----

ԿԵՆՍԱՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ

<i>Վ. Ա. Սաքանյան, Ս. Ա. Իրադյան, Ն. Ս. Իրադյան</i> – Քաղցկեղի բուժման նպատակային EGFR-ի քայքայման մշակում	218
--	-----

ԲՈՒՍԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

<i>Ժ. Հ. Վարդանյան</i> – Հայաստանում դենդրոպարկերի ստեղծման գիտական նախադրյալները և դրանց զարգացման հեռանկարները	228
<i>Ա. Ս. Հայրապետյան, Ա. Հ. Մուրադյան</i> – Հայաստանի ֆլորայի <i>Iris L.</i> ցեղի (<i>Iridaceae</i>) <i>Limniris</i> (<i>Tausch</i>) <i>Spach</i> և <i>Scorpiris</i> <i>Spach</i> ենթացեղերի պալինոմորֆոլոգիական համեմատական վերլուծություն	239

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

<i>В. К. Леонтьев, Г. Л. Мовсисян, Ж. Г. Маргарян – Шары в булевом пространстве</i>	175
---	-----

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

<i>А. А. Чубарян – Отношение между сложностями выводов в системах Фреге и системах глубинных правил выводов KS и eKS</i>	182
--	-----

МЕХАНИКА

<i>Г. Г. Шемян, А. В. Геворкян – Критерии работоспособности и объемная прочность конструктивных элементов машин с концентраторами напряжений</i>	188
<i>С. О. Саркисян – Прикладные задачи статического поперечного изгиба и устойчивости листа графена</i>	196

ГЕОФИЗИКА

<i>Дж. К. Карапетян, А. С. Гаспарян, С. Р. Шахпаронян, Г. М. Матевосян, Р. К. Карапетян, А. С. Шахпаронян – Сейсмический датчик для систем мониторинга. Разработка и результаты</i>	207
---	-----

БИОТЕХНОЛОГИЯ

<i>В. А. Саканян, М. А. Ирадян, Н. С. Ирадян – Разработка направленной деградации EGFR для лечения рака.....</i>	218
--	-----

БОТАНИКА

<i>Ж. А. Варданян – Научные предпосылки создания дендропарков в Армении и перспективы их развития</i>	228
<i>А. М. Айрапетян, А. Г. Мурадян – Сравнительный палиноморфологический анализ подродов <i>Limniris</i> (Tausch) Spach и <i>Scorpiris</i> Spach рода <i>Iris</i> L. (Iridaceae) флоры Армении</i>	239

CONTENTS

MATHEMATICS

<i>V. K. Leontiev, G. L. Movsisian, Zh. G. Margaryan</i> – Spheres in Boolean Spase	175
---	-----

APPLIED MATHEMATICS

<i>A. A. Chubaryan</i> – Relations between the Proof Complexities in Frege Systems, Deep-Inference Proof Systems KS and eKS	182
---	-----

MECHANICS

<i>H. G. Shekryan, A. V. Gevorkyan</i> – Performance Criteria and Bulk Strength of Structural Elements of Machines with Stress Concentrators	188
<i>S. H. Sargsyan</i> – Applied Problems of Static Transverse Bend and Stability of a Graphene Sheet	196

GEOPHYSICS

<i>J. K. Karapetyan, A. S. Gasparyan, S. R. Shakhparonyan, G. A. Matevosyam, R. K. Karapetyan, H. S. Shakhparonyan</i> – Seismic Sensor for Monitoring Systems. Development and Results	207
---	-----

BIOTECHNOLOGY

<i>V. A. Sakanyan, M. A. Iradyan, N. S. Iradyan</i> – Development of Targeted EGFR Degradation for Cancer Treatment	218
---	-----

BOTANY

<i>Zh. H. Vardanyan</i> – Scientific Prerequisites for the Creation of Arboretums in Armenia and Prospects for Their Development	228
<i>A. M. Hayrapetyan, A. H. Muradyan</i> – Comparative Palynomorphological Analysis of the Subgenera <i>Limniris</i> (Tausch) Spach and <i>Scorpiris</i> Spach of the Genus <i>Iris</i> L. (Iridaceae) of the Flora of Armenia	239

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

Шары в булевом пространстве

(Представлено академиком С. К. Шукурзяном 24/V 2022)

Ключевые слова: булево пространство, сумма множеств по Минковскому, сумма шаров, весовая функция, производная функция.

Введение. Во многих задачах комбинаторного анализа используются операции сложения множеств (сумма, прямая сумма, прямое произведение и т.п.). В данной работе, как и в предыдущих [1, 2], приводятся некоторые свойства операции сложения множеств (сложения по Минковскому) в булевом пространстве B^n и рассматриваются суммы «классических фигур», таких как шар. Полученные результаты позволяют описать суммы через такие характеристики слагаемых, как радиус шара и расстояние между центрами.

1. Сумма множеств по Минковскому.

Если $x = (x_1 x_2 \dots x_n)$, $y = (y_1 y_2 \dots y_n)$ — точки из B^n , то

$$x + y = ((x_1 \oplus y_1)(x_2 \oplus y_2) \dots (x_n \oplus y_n)),$$

где $\oplus$ – операция сложения по mod 2,

$$x \cdot y = ((x_1 \cdot y_1)(x_2 \cdot y_2) \dots (x_n \cdot y_n)), \quad \text{где} \quad x_i y_i = \max \{x_i, y_i\}$$

Эта операция сложения элементов из B^n может быть продолжена на подмножества B^n . Другими словами, если $X, Y \in 2^{B^n}$, то

$$X + Y = \{x + y; x \in X, y \in Y\}.$$

Таким образом, сумма подмножеств $X + Y$ состоит из сумм точек, принадлежащих соответственно X и Y .

Примеры.

1. Если $X \in 2^{B^n}$, $y \in B^n$, то $\{X + y\}$ – «сдвиг» множества X на точку y и $|X + y| = |X|$.
2. Если X – подпространство B^n , то $X + X = X$.
3. $X + B^n = B^n$ для любого $X \in 2^{B^n}$.

Иначе, $\{X + Y\}$ можно интерпретировать как объединение «сдвигов» множеств X на точки из множества Y .

Семейство $(2^{B^n}, +)$ с введенной операцией «+»-сложения по Минковскому образует моноид с нейтральным элементом $\{0^n\}$ – одноэлементным множеством, состоящим из нулевого элемента B^n .

Ниже перечислены простые свойства операции «+»-сложения по Минковскому, которые можно рассматривать как свойства алгебраической системы с основным множеством 2^{B^n} и операциями: сумма, объединение, пересечение и др.:

1. ассоциативность $X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$;
2. коммутативность $X + Y = Y + X$;
3. дистрибутивность по объединению, пересечению, вычитанию, умножению $(X \cup Y) + Z = (X + Z) \cup (Y + Z)$;
4. $(X \cap Y) + Z = (X + Z) \cap (Y + Z)$;
5. $(X \setminus Y) + Z = (X + Z) \setminus (Y + Z)$;
6. $(X \cdot Y) + Z = (X + Z) \cdot (Y + Z)$.

Конечно, имеется много других соотношений, связывающих элементы определенной выше алгебраической системы.

2. Сумма шаров в B^n . Пусть $\rho(x, y) = \|x + y\|$ – расстояние Хемминга между точками $x, y \in B^n$.

Шар $S_t^n(v)$ с центром в точке $v \in B^n$ и радиуса t определяется стандартным образом

$$S_t^n(v) = \{x \in B^n \mid \rho(v, x) \leq t\} \quad (1)$$

и имеет мощность

$$S_t^n = |S_t^n(v)| = \sum_{k=0}^t \binom{n}{k}.$$

Семейство шаров $\{S_t^n(a)\}$ играет значительную роль как в теории корректирующих кодов [3], так и в комбинаторной математике в целом [4, 5].

В частности, мощность пересечения шаров радиуса t является важным параметром в модели передачи информации по нескольким каналам [6].

Отметим, что формула (1) допускает следующее обобщение, связанное с суммированием.

Пусть $M \in 2^{B^n}$ и $S_t^n(M)$ – множество точек, принадлежащих объединению шаров радиуса t с центром в точках M , т.е.

$$S_t^n(M) = \bigcup_{x \in M} S_t^n(x).$$

$S_t^n(M)$ – «обобщенный» шар радиуса t с центром в точках M .

При этом дополнение обобщенного шара $S_t^n(M)$ в B^n является обобщенным шаром. Точнее,

$$\overline{S_t^n(M)} = \bigcup_{x \in M} S_{n-t-1}^n(\overline{x}),$$

где « $\overline{}$ » – логическое дополнение (отрицание) в булевой алгебре.

В алгебраическом аспекте множество всех шаров в булевом кубе B^n также обладает целым рядом интересных свойств, некоторые из которых перечислены ниже.

$$1. S_{t_1}^n(M_1) + S_{t_2}^n(M_2) = S_{t_1+t_2}^n(M_1 + M_2).$$

Таким образом, при сложении по Минковскому двух шаров соответственно радиусами t_1, t_2 и с центрами в множествах M_1, M_2 соответственно получается шар радиуса $t_1 + t_2$ с центром в $M_1 + M_2$.

При этом если $t_1 + t_2 \geq n$, то

$$S_{t_1}^n(M_1) + S_{t_2}^n(M_2) = B^n.$$

$$2. S_p(M) = M + S_p(0).$$

Обобщенный шар с центрами в точках множества M можно представить в виде суммы по Минковскому множества M и шара с центром в нулевой точке.

$$3. S_{t_1}^n(S_{t_2}^n(M)) = S_{t_1+t_2}^n(M).$$

1) Пусть $\overline{F}_{a,t}(z)$ – весовая функция сферы радиуса t с центром в $a \in B^n$

$$\overline{F}_{a,t}(z) = \sum_{x \in C_t^n(a)} z^{\|x\|},$$

где $C_t^n(a) = S_t^n(a) \setminus S_{t-1}^n(a)$.

Утверждение 1. Имеет место соотношение

$$\overline{F}_{a,t}(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint \frac{(1+uz)^{n-\|a\|}(u+z)^{\|a\|}}{u^{t+1}} du$$

$$|u| = \rho$$

где $\rho < 1$.

Если рассматривать $\|x\|$ для $x \in C_t^n(0)$ как случайную величину ξ , равномерно распределенную по сфере $C_t^n(a)$, то утверждение 1 позволяет находить параметры этого распределения.

2) **Следствие.** Имеет место соотношение

$$1. M\xi = t + \|a\| - 2t \frac{\|a\|}{n}.$$

$$2. \text{ Если } \|a\| = o(n) \text{ и } t = o(n), \text{ то } D\xi = \frac{4t\|a\|(\|a\| + t)}{n}.$$

Пусть $F_{a,t}(z)$ – весовая функция шара $S_t^n(a)$ радиуса t с центром в точке $a \in B^n$, т. е.

$$F_{a,t}(z) = \sum_{x \in S_t^n(a)} z^{\|x\|}.$$

Утверждение 2. Имеет место соотношение

$$F_{a,t}(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|u|=\rho} \frac{(1+uz)^{n-\|a\|}(z+a)^{\|a\|}}{(1-u)^{t+1}} du,$$

где $\rho < 1$.

Если $\Phi_{a,t}(z)$ – производная функция расстояния в шаре радиуса в B^n или

$$\Phi_{a,t}(z) = \sum_{x,y \in S_t^n(a)} z^{\rho(x,y)},$$

то справедливо

Утверждение 3. Имеет место соотношение

$$\Phi_{a,t}(z) = z^{t+1} \sum_{p=0}^t \binom{n}{p} z^p \oint_{|u|=\rho} \frac{(1+u)^{n-p} \left(1 + \frac{u}{z^2}\right)^p}{(z-u)u^{t+1}} du, \quad (2)$$

где $\rho < 1$.

Если $\xi = \rho(x, y)$ – случайная величина, равномерно распределенная в шарах $S_t^n(0)$, и $W_t(z)$ – производные функции этой случайной величины, то

$$W_t(z) = \frac{1}{(S_t^n)^2} \sum_{x,y \in S_t^n(a)} z^{\rho(x,y)} = \frac{\Phi_t(z)}{(S_t^n)^2}$$

Из (2) вытекает:

Следствие. $M_\xi = \frac{2nS_{t-1}^{n-1}}{(S_t^n)^2} S_t^{n-1}.$

Следствие. Если $t = o(\sqrt{a})$, то

$$M_\xi = 2t - O\left(\frac{t^2}{n}\right).$$

Рассмотрим весовую функцию $F_t(z)$ пересечения двух шаров $S_t^n(a)$ и $S_t^n(0)$:

$$F_t(z) = \sum_{x \in S_t^n(a) \cap S_t^n(0)} z^{\|x\|},$$

Утверждение 4. Имеет место соотношение

$$F_t(z) = \sum_{r,m=0}^t z^m. \quad (3)$$

Суммирование в формуле (3) происходит по всем параметрам r и m , для которых биномиальный коэффициент определен.

Следствие. Пусть $\lambda(n, t) = \max_a \left\{ |S_t^n(0) \cap S_t^n(a)| \right\}$. Тогда

$$\lambda(n, t) = \min \{ 2S_{t-1}^{n-1}, 2^n \} \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что любой шар радиуса t из B^n однозначно определяется $(\lambda(n, t) + 1)$ -точками и это число является минимальным для определимости шара радиуса t . При этом «определимость» означает следующее: если два шара радиуса t имеют в пересечении $\lambda(n, t)$ и больше точек, то они совпадают.

Если $\|a\| = k$, то выражение $F_t(z)$ можно записать в следующей форме:

$$F_t(z) = \sum_{r,m} z^m \operatorname{coef}_{u,v} \left\{ \frac{(1+u)^{n-k} (1+uv^2)^k}{u^{m+1} v^{m-r+k+1}} \right\}. \quad (5)$$

Из (5) получается

Утверждение 5. Имеет место соотношение

$$F_t(z) = \operatorname{coef}_{u,v} \left\{ \frac{(1+u)^{n-k} (1+uv^2)^k}{(1-v)(uv-z)v^k} \left(1 - \left(\frac{z}{uv} \right)^{t+1} \right) (1-v^{t+1}) \right\}.$$

Следствие. Справедлива формула

$$|S_t^n(a) \cap S_t^n(b)| = \sum_r \binom{k}{r} S_{t-r}^{n-k} + \sum_r \binom{k}{r} S_{t-k+r}^{n-k}. \quad (6)$$

$$k < 2r < \min\{2k, t + k + 1\},$$

где $\rho(a, b) = k$.

Из (6) следует, что

$$|S_t^n(a) \cap S_t^n(b)| = 2S_{t-1}^{n-1} \text{ при } \rho(a, b) = 1,$$

$$|S_t^n(a) \cap S_t^n(b)| = \binom{2t}{t} \text{ при } \rho(a, b) = 2t.$$

Рассмотрим производную функцию

$$F_t(a, b, z_1, z_2) = \sum_x z_1^{\rho(x, a)} z_2^{\rho(x, b)}.$$

$$\rho(x, a) \leq t,$$

$$\rho(x, b) \leq t.$$

Утверждение 6. Имеет место соотношение

$$F_t(a, b, z_1, z_2) = \underset{u, v}{\text{coef}} \left\{ \frac{(1 - (\frac{z_1}{u})^{t+1})}{u - z_1} \frac{(1 - (\frac{z_2}{v})^{t+1})}{v - z_2} (1 + uv)^{n - \rho(a, b)} (u + v)^{\rho(a, b)} \right\}.$$

Если выбрать в B^n «случайным» образом два шара радиуса t , то мощность их пересечения $|S_t^n(a) \cap S_t^n(b)|$ зависит только от расстояния между центрами этих шаров.

Если обозначим через $\xi_t(a, b)$ случайную величину, определяемую следующим образом:

$$\xi_t(a, b) = |S_t^n(a) \cap S_t^n(b)|,$$

то справедливо

Утверждение 7. Имеет место соотношение

$$M \xi_t(a, b) = \frac{(S_t^n)^2}{2^n}.$$

¹ ФИЦ ИУ РАН, Москва

² Группа Бит, Москва

³ Ереванский государственный университет

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

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

Шары в булевом пространстве

Приводятся некоторые свойства операции сложения множеств (сложения по Минковскому) в булевом пространстве и рассматриваются суммы таких фигур, как шары. Полученные результаты позволяют описать суммы через такие характеристики слагаемых, как радиус шара и расстояние между центрами.

Վ. Կ. Լեոնտիև, Դ. Լ. Մովսիսյան, Ջ. Գ. Մարգարյան

Գնդեր բուլյան տարածությունում

Բերված են գումար (գումար ըստ Մինկովսկու) գործողության որոշակի հատկություններ բուլյան տարածության համար, և դիտարկվում է այնպիսի պատկերների գումար, ինչպիսին գնդերն են: Ստացված արդյունքները հնարավորություն են տալիս նկարագրելու գումարը այնպիսի բնութագրիչներով, ինչպիսին են գնդերի շառավիղները և կենտրոնների միջև հեռավորությունը:

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

Spheres in Boolean Spase

The operation of addition of sets is used in numerous problems of combinatorics. In the present paper some properties of the addition operation of sets (the Minkowski addition) in Boolean space are presented and the additions of spheres are considered. The obtained results make possible to describe the sums through such characteristics as the sphere radii and the distances between the sphere centres.

Литература

1. *Leontiev V. K., Movsisyan G. L., Margaryan Zh. G.* – Open Journal of Discrete Mathematics (OJDM). 2016. V. 6. № 2. P. 25-40.
2. *Леонтьев В. К., Мовсисян Г. Л., Маргарян Ж. Г.* – ДНАН РА. 2017. Т. 117. № 2. С. 106-119.
3. *Мак-Вильямс Ф. Дж.* Теория кодов, исправляющих ошибки. М. Связь., 1979. 744 с.
4. *Бурдюк В. Я.* Дискретные метрические пространства. Днепропетровск. ДГУ. 1982. 99 с.
5. *Леонтьев В. К.* – Журн. выч. мат. и мат. физ. 2009. Т. 49. № 11. С. 2041-2053.
6. *Леонтьев В. К.* – Журн. выч. мат. и мат. физ. 2008. Т. 48. № 6. С. 1126-1139.
7. *Егорычев Г. П.* Интегральное представление и вычисление комбинаторных сумм. Новосибирск. Наука. 1977. 286 с.

APPLIED MATHEMATICS

УДК 510.64

DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.3-182

A. A. Chubaryan

**Relations between the Proof Complexities in Frege Systems,
Deep-Inference Proof Systems KS and eKS**

(Submitted by academician Yu. H. Shoukourian 4/VIII 2022)

Keywords: *deep-inference system, Frege system, determinative size of formula, exponential speed-up.*

Introduction. Traditionally, proof theory has been concerned with formal representations of the notion of proof as it occurs in mathematics or other intellectual activities, but the rapid development of computer science has brought about a dramatic change of attitude. Efficiency has become a primary concern and this fact has given rise to a whole new area of research in which the considerations of complexity playing a major role. Open questions of theoretical computer science like $P = ? NP$ and $NP = ? co-NP$ have tight connection with the proof complexities in the field of propositional logic [1].

Deep inference is a relatively new methodology in proof theory, consisting in dealing with proof systems whose inference rules are applicable at any depth inside formulae [2-4]. While the inference rules of well known sequent calculus or natural deductions decompose formulas along their main connectives, deep inference rules are allowed to do arbitrary rewriting inside formulas. The main interesting results about the proof complexity of deep inference are 1) some deep-inference proof systems (SKS) is as powerful as Frege ones; 2) there is deep-inference proof systems (KS) that exhibit an exponential speed-up over cut-free Gentzen proof systems; 3) Frege systems and some deep-inference system eKS polynomially simulate the system KS. The reverse relations are pointed in [2] as open problems. It is proved here that a Frege system and the system eKS have an exponential speed-up over the system KS.

2. Preliminaries. To prove our main result, we recall some notions and notation from [1-4]. We will use the current concepts of the unit Boolean cube (E^n), a propositional formula, a tautology, a proof system for propositional logic and proof complexities. The language of considered systems contains the

propositional variables, logical connectives $\neg, \&, \vee$ and parentheses $(,)$. Note that some parentheses can be omitted in generally accepted cases. For the sake of simplicity, we consider only formulas in negation normal form. More precisely, formulas are generated from a countable set of propositional variables and their negations via the binary connectives $\&$ and $\vee$.

2.1. Considered proof systems and proof complexities. The inference rules of system KS (original CoS – *calculus of structures*) are

$$\begin{array}{l} \textbf{ai} \downarrow \frac{F\{B\}}{F\{B\&[\neg a \vee a]\}} \quad \textbf{s} \frac{F\{A\&[B \vee C]\}}{F\{(A\&B) \vee C\}} \quad \textbf{w} \downarrow \frac{F\{B\}}{F\{B \vee A\}} \quad \textbf{ac} \downarrow \frac{F\{a \vee a\}}{F\{a\}} \\ \textbf{m} \frac{F\{(A\&B) \vee (C\&D)\}}{F\{[A \vee C]\&[B \vee D]\}}, \end{array} \quad (1)$$

where A, B, C , and D must be seen as formula variables, and a is a propositional variable or its negation and $F\{E\}$ means that E is some subformula in F . These rules are called (*atomic*) *identity*, *switch*, *weakening*, (*atomic*) *contraction*, and *medial*, respectively. The rules in (1) are written in the style of inference rule schemes in proof theory but they behave as rewrite rules in term rewriting, i.e., they can be applied *deep* inside any (positive) formula context.

In order to obtain proofs without hypotheses, we need an axiom, which is in our case just a variant of the rule $\textbf{ai} \downarrow$:

$$\textbf{ai} \downarrow \frac{}{\neg a \vee a}.$$

A proof in KS uses the axiom exactly once.

The system eKS (sKS) is obtained from the system KS by adding the specific *extension* (*substitution*) inference rule [3].

A **Frege system** $\mathcal{F}$ uses a denumerable set of propositional variables, a finite, complete set of propositional connectives; $\mathcal{F}$ has a finite set of inference rules defined by a figure of the form $\frac{A_1 A_2 \dots A_m}{B}$ (the rules of inference with zero hypotheses are the axioms schemes); $\mathcal{F}$ must be sound and complete, i.e.,

for each rule of inference $\frac{A_1 A_2 \dots A_m}{B}$ every truth-value assignment, satisfying

$A_1 A_2 \dots A_m$, also satisfies B , and $\mathcal{F}$ must prove every tautology.

In the theory of proof complexity two main characteristics of the proof are: ***l*-complexity** to be the size of a proof (= the sum of all formulae sizes) and ***t*-complexity** to be its length (= the total number of lines). The minimal ***l*-complexity** (***t*-complexity**) of a formula φ in a proof system Φ we denote by $l^\Phi(\varphi)$ ($t^\Phi(\varphi)$).

Let Φ_1 and Φ_2 be two different proof systems.

Definition 2.1.1. The system Φ_1 *p-l-simulates* (*p-t-simulates*) the system Φ_2 if there exist the polynomial $p()$ such, that for each formula φ provable both in the systems Φ_1 and Φ_2 , we have

$$l^{\Phi_1}(\varphi) \leq p(l^{\Phi_2}(\varphi)) \quad (t^{\Phi_1}(\varphi) \leq p(t^{\Phi_2}(\varphi))).$$

Definition 2.1.2. The systems Φ_1 and Φ_2 are *p-l-equivalent* (*p-t-equivalent*), if systems Φ_1 and Φ_2 *p-l-simulate* (*p-t-simulate*) each other.

It is well-known that any two Frege systems are *p-l-equivalent* (*p-t-equivalent*) [1].

It is proved in [3] that

- Frege systems *p-l-simulate* (*p-t-simulate*) the system KS,
- the system eKS *p-l-simulates* (*p-t-simulates*) both the systems KS and sKS.

Definition 2.1.3. If for some sequence of formulas φ_n in the two systems ϕ_1 and ϕ_2 for sufficiently large n is valid $t^{\phi_1}(\varphi_n) = \Omega(2^{t^{\phi_2}(\varphi_n)})$ ($l^{\phi_1}(\varphi_n) = \Omega(2^{l^{\phi_2}(\varphi_n)})$), then we say that the system ϕ_2 has exponential sped-up by lines (by sizes) over the system ϕ_1 .

2.2. Determinative size of formulas. Following the usual terminology we call the variables and negated variables literals. The conjunct K (clause) can be represented simply as a set of literals (no conjunct contains a variable and its negation simultaneously). In [5] the following notions were introduced.

We call a replacement-rule each of the following trivial identities for a propositional formula ψ :

$$\begin{aligned} 0 \&\psi = 0, \psi \& 0 = 0, 1 \&\psi = \psi, \psi \& 1 = \psi, \psi \&\psi = \psi, \psi \&\neg\psi = 0, \neg\psi \&\psi = 0, \\ 0 \vee \psi = \psi, \psi \vee 0 = \psi, 1 \vee \psi = 1, \psi \vee 1 = 1, \psi \vee \psi = \psi, \psi \vee \neg\psi = 1, \neg\psi \vee \psi = 1, \\ \neg 0 = 1, \neg 1 = 0, \neg\neg\psi = \psi. \end{aligned}$$

Application of a replacement-rule to some word consists in replacing some its subwords, having the form of the left-hand side of one of the above identities by the corresponding right-hand side.

Let φ be a propositional formula, let $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ be the set of the variables of φ , and let $P' = \{p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_m}\}$ ($1 \leq m \leq n$) be some subset of P .

Definition 2.2.1. Given $\sigma = \{\sigma_1, \dots, \sigma_m\} \in E^m$, the conjunct $K^\sigma = \{p_{i_1}^{\sigma_1}, p_{i_2}^{\sigma_2}, \dots, p_{i_m}^{\sigma_m}\}^{1)}$ is called *φ -determinative* if assigning σ_j ($1 \leq j \leq m$) to each p_{i_j} and successively using replacement-rules we obtain the value of φ (0 or 1) independently of the values of the remaining variables.

Definition 2.2.2. We call the minimal possible number of variables in a φ -1-determinative conjunct the *determinative size of φ* and denote it by $ds(\varphi)$.

A tautology is called *minimal* if it can not be obtained by some substitution in a shorter tautology.

It is proved in [5] that

1) if for some minimal tautology φ $ds(\varphi)=m$, then the number of φ -1-determinative conjuncts is at least 2^m ;

2) if for some minimal tautology φ there is such m that every conjunct with m literals is φ -1-determinative, then the number of φ -1-determinative conjuncts is no more than 2^m .

Note that every subformula is formula ones, hence above definitions are applicable to subformulas as well.

By $|\varphi|$ we denote the *size of a formula* φ , defined as the number of all propositional variables entries in it. If formula is given in negative normal form, then it is obvious that the full size of a formula, which is understood to be the number of all symbols is bounded by some linear function in $|\varphi|$.

3. Main formulas. Before we shall prove the main theorems, we must give some auxiliary results.

3.1. In some papers in area of propositional proof complexity for classical logic the following tautologies (Topsy-Turvy Matrix) play key role

$$TTM_{n,m} = \bigvee_{(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \in E^n} \&_{j=1}^m \bigvee_{i=1}^n p_{ij}^{\sigma_i} \quad (n \geq 1, 1 \leq m \leq 2^n - 1).$$

For all fixed $n \geq 1$ and m in above indicated intervals every formula of this kind expresses the following true statement: given a 0,1- matrix of order $n \times m$ we can “topsy-turvy” some strings (writing 0 instead of 1 and 1 instead of 0) so that each column will contain at least one 1.

For the below given Theorem 1. the main tautologies of our consideration are $\varphi_n = TTM_{n, 2^n - 1}$.

It is not difficult to see that $|\varphi_n| = n(2^n - 1)2^n$, $ds(\varphi_n) = 2^n - 1$ and number of different $\varphi_n - 1$ – **determinative** conjuncts is $2^{2^n - 1}$.

3.2. **Balanced formulas.** A formula A is balanced if every propositional variable occurring in A occurs exactly twice, once positive and once negated. For the below given Theorem 2. the main tautologies of our consideration are the balanced tautologies $QHQ_n = \bigvee_{0 \leq i \leq n} \&_{1 \leq j \leq n} [V_{1 \leq k \leq i} \bar{q}_{i,j,k} \vee V_{i < k \leq n} q_{k,j,i+1}]$ ($n \geq 1$). Put $Q_{i,j} = V_{1 \leq k \leq i} \bar{q}_{i,j,k} \vee V_{i < k \leq n} q_{k,j,i+1}$ ($n \geq 1$, $0 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$), then $QHQ_n = \bigvee_{0 \leq i \leq n} (Q_{i1} \& Q_{i2} \& \dots \& Q_{ij} \& \dots \& Q_{i(n-1)} \& Q_{in})$ and hence $ds(QHQ_n) = n$, therefore the number of QHQ_n -1-determinative conjuncts is at least 2^n . It is also not difficult to see, that $|QHQ_n| = \frac{3n^2(n+1)}{2} - 1$.

4. Main results.

Theorem 1. *Every Frege system has exponential speed-up over the system KS.*

Proof is founded on the two following propositions:

- 1) Frege-proofs of tautologies φ_n ($n \geq 1$) are t -polynomially (l -polynomially) bounded (this statement is proved in [6]);
- 2) for sufficiently large n and sequence of formulas φ_n the following holds: $t^{KS}(\varphi_n) = \Omega(2^{2^n})$, therefore $l^{KS}(\varphi_n) = \Omega(2^{2^n})$ as well.

The proof of second statement follows from the values of determinative sizes of φ_n and number of different $\varphi_n - 1$ – determinative conjuncts,

as well from possible changes of determinative sizes by applications of inference rules of KS:

$$\begin{aligned} ds(\neg a \vee a) &= 1, & ds(B \& [\neg a \vee a]) &\leq ds(B) + 1, \\ ds([(A \& B) \vee C]) &\leq ds((A \& [B \vee C])), & ds(B \vee A) &\leq ds(B), \\ ds(a) &= ds(a \vee a), & ds([A \vee C] \& [B \vee D]) &\leq ds(A \& B \vee C \& D), \end{aligned}$$

and some important condition of rule s.

Theorem 2. *The system eKS has exponential speed-up over the system KS.*

Proof is founded on the following propositions:

- 1) sKS-proofs of tautologies $\mathbf{QH}Q_n$ ($n \geq 1$) are t -polynomially (l -polynomially) bounded (this statement is proved in [3]);
- 2) the system eKS p - l -simulates (p - t -simulates) the system sKS [3].
- 3) for sufficiently large n and sequence of formulas $\mathbf{QH}Q_n$ the following holds: $t^{KS}(\mathbf{QH}Q_n) = \Omega(2^n)$, therefore $t^{KS}(\mathbf{QH}Q_n) = \Omega(2^n)$ as well.

The proof of last statement follows from the values of determinative sizes of $\mathbf{QH}Q_n$ and number of different $\mathbf{QH}Q_n$ -1-determinative conjuncts.

Remark. Both theorems can be proved only on the base of formulas $\mathbf{QH}Q_n$ because it is proved that they have t -polynomially (l -polynomially) bounded Frege-proofs (this statement is proved in one of my previous papers, which is now in the process of publication).

Conclusion. L. Strasburger's conjectures that KS does not p -simulate Frege systems and eKS system are proved.

Yerevan State University
e-mail: achubaryan@ysu.am

A. A. Chubaryan

Relations between the Proof Complexities in Frege Systems, Deep-Inference Proof Systems KS and eKS

Using the determinative sizes for tautologies of some sequences, it is proved in this paper that a Frege system and deep-inference proof system eKS exhibit an exponential speed-up over the deep-inference proof systems KS both by lines and size of proofs.

Ա. Ա. Չուբարյան

Արտածումների բարդությունների հարաբերությունները Ֆրեգեի համակարգերի, խորքային արտածման կանոններով KS և eKS համակարգերի միջև

Օգտագործելով որոշակի հաջորդականությունների նույնաբանությունների որոշիչ երկարությունները՝ ապացուցվել է, որ Ֆրեգեի համակարգերը և խորքային արտածման կանոններով eKS համակարգը ցուցաբերում են էքսպոնենցիալ արագացում խորքային արտածման կանոններով KS համակարգի նկատմամբ՝ և՛ ըստ արտածումների քայլերի, և՛ ըստ դրանց երկարությունների:

А. А. Чубарян

**Отношение между сложностями выводов в системах Фреге
и системах глубинных правил выводов KS и eKS**

Используя величины определяющих длин тавтологий некоторых последовательностей, доказано, что системы Фреге и система глубинных правил выводов eKS проявляют экспоненциальное ускорение относительно системы глубинных правил выводов KS как по шагам, так и по длинам выводов.

References

1. Cook S., Reckhow A. R. – Symbolic Logic. 1979. V. 44. P. 36-50.
2. Guglielmi A., Straßburger L. – Computer Science Logic, CSL. 2001. V. 2142 of LNCS. 2001. P. 54–68.
3. Straßburger L. – Annals of Pure and Applied Logic. 2012. V. 163. P. 1995-2007.
4. Bruscoli P., Guglielmi A. – ACM Transactions on Computational Logic. 2009. V. 10 (2). P. 1–34, article 14.
5. Чубарян Ан. А., Чубарян Арм. А. – Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени, НАУ, часть 10, 2(7). 2015. С.11-14.
6. Chubaryan An. – Proceedings of NASA RA. 2002. V. 37. № 5 and Journal of CMA (AAS). 2002. V. 37. № 5. P. 71-84.

МЕХАНИКА

УДК 628.81/25

DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.3-188

Г. Г. Шемян¹, А. В. Геворкян²

Критерии работоспособности и объемная прочность конструкционных элементов машин с концентраторами напряжений

(Представлено академиком Л. А. Агаловяном 3/V 2022)

Ключевые слова: концентратор напряжения, режимы нагружения, коэффициент концентрации, местные напряжения.

Наличие отверстий, канавок, напрессовок, надрезов и других концентраторов напряжений порождает местные напряжения, намного отличающиеся от номинального. Оценка прочности таких деталей требует их учета, поскольку наибольшее местное напряжение может значительно превышать номинальное. Такие напряжения характеризуются высоким градиентом и могут быстро убывать по мере удаления от концентратора.

Коэффициент концентраций (отношение наибольшего местного напряжения к номинальному) в упругой области определяется выражением [1, 2]

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}} ; \alpha_{\tau} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{ном}}} . \quad (1)$$

Величина коэффициента α , характеризующего влияние формы концентратора на распределение напряжений, не является, однако, мерилom снижения прочности. Фактическое снижение прочности зависит не только от формы (надреза) концентратора, но и от свойств материала детали, проявляющихся по-разному, в зависимости от режима нагружения. Эффективный коэффициент напряжения оценивается отношением предельных напряжений гладкого образца и образца с концентраторами, имеющих одинаковые размеры.

При статическом нагружении

$$(K_{\sigma})_c = \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma'_{\sigma}} \text{ и } (K_{\tau})_c = \frac{\tau_{\sigma}}{\tau'_{\sigma}}, \quad (2)$$

где σ_{σ} , τ_{σ} и σ'_{σ} , τ'_{σ} – соответствующие значения пределов прочности гладких образцов (σ_{σ} , τ_{σ}) и образцов с концентраторами (σ'_{σ} , τ'_{σ}).

При нагружении, вызывающем переменное напряжение,

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_r}{\sigma'_r}, \quad K_{\tau} = \frac{\tau_r}{\tau'_r}, \quad (3)$$

где σ_r , τ_r , σ'_r , τ'_r – соответствующие значения пределов выносливости гладкого и с надрезами образцов одинаковых размеров. В процессе эксплуатации машин под действием нагрузок, приложенных к деталям, в случае недостаточной их прочности могут возникнуть недопустимо большие остаточные деформации и разрушения.

Целью настоящей работы является разработка методов расчета напряженного состояния деталей машин с учетом наличия концентраторов и эксплуатационных условий.

Задача обеспечения необходимой и достаточной прочности состоит в том, чтобы определить размеры и формы деталей, исключающие возможность появления недопустимо большой остаточной деформации, преждевременных поломок и поверхностных разрушений. Проявление этого эффекта разными материалами оценивается коэффициентом чувствительности, под которым следует понимать отношение фактической величины наибольшего местного напряжения материала к концентрации напряжения (q), которая теоретически подсчитывается выражением [2, 3]

$$q_{\sigma} = \frac{K_{\sigma} \sigma_{ном} - \sigma_{ном}}{\alpha_{\sigma} \sigma_{ном} - \sigma_{ном}} = \frac{K_{\sigma} - 1}{\alpha_{\sigma} - 1} \text{ для нормальных напряжений,}$$

$$q_{\tau} = \frac{K_{\tau} - 1}{\alpha_{\tau} - 1} \text{ для касательных напряжений.}$$

При известных α и q коэффициент концентрации напряжения

$$K_{\sigma} = 1 - q_{\sigma}(\alpha_{\sigma} - 1); \quad K_{\tau} = 1 + q_{\tau}(\alpha_{\tau} - 1) \quad (4)$$

Если $q_{\sigma} = 0$ и $q_{\tau} = 0$, то $K_{\sigma} = 1$ и $K_{\tau} = 1$, т.е. материал не чувствителен к концентраторам. Если же $q_{\sigma} = 1$, $q_{\tau} = 1$, то $K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}$ и $K_{\tau} = \alpha_{\tau}$ т.е. материал отличается высокой чувствительностью к концентраторам. При нагружениях, вызывающих статические напряжения, условия

прочности $\sigma \leq [\sigma]$ или $\tau \leq [\tau]$, где $[\sigma] = \frac{\sigma_{np}}{n}$, $[\tau] = \frac{\tau_{np}}{n}$,

видоизменяются в зависимости от состояния материала (пластичности или хрупкости).

Среднее нормальное (касательное) напряжение имеет вид

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, (\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}),$$

α – амплитуда цикла, $\sigma_a(\tau_a)$ равны

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}, r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \left(r = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \right).$$

Здесь r – коэффициент асимметрии цикла.

Пределы выносливости, зависящие от r , обозначаются через σ_{-1} при $r = -1$ для симметричного цикла, σ_0 при $r = 0$ для пульсирующего цикла.

Влияние степени асимметрии цикла необходимо установить с помощью диаграмм предельных напряжений в координатах $\sigma_m(\tau_m)$ и $\sigma_a(\tau_a)$ или $\sigma_{\max}(\tau_{\max})$ и $\sigma_{\min}(\tau_{\min})$.

В расчётах часто применяется диаграмма, схематизированная по способу, предложенному С.В. Серенсоном и Р.С. Кинасошвили и уточняющая значения пределов в области циклов с $r = -1 \div 0$ при известных значениях σ_{-1} , σ_0 и σ_σ . Наиболее точные представления о фактической прочности деталей машин можно получить из результатов натурных испытаний, воспроизводящих эксплуатационные условия нагружения [4, 5].

Конструкционные формы оказывают значительное влияние на способность деталей машин сопротивляться действию переменных напряжений. Например, в результате испытаний коленчатых валов установлено, что их предел выносливости при симметричном кручении составляет около 0.07 предела прочности материала и 0.38% предела выносливости при симметричном кручении. Это объясняется тем, что реальные формы и размеры деталей машин отличаются от форм и размеров гладких образцов (влияние формы учитывается по формуле (3)) [5].

Для хрупких материалов с неоднородной структурой, таких как чугун, в качестве предельного напряжения следует применять предел прочности, для пластических материалов под предельным напряжением – соответствующие пределы текучести. При статических нагружениях концентрация напряжений не снижает несущую способность деталей, изготовленных из пластических материалов. Это объясняется тем, что местные пластические деформации способствуют перераспределению и выравниванию напряжений в сечениях деталей. В зоне концентрации при этом происходит упрочнение. В связи с этим расчёты на прочность при статических напряжениях для деталей из пластических материалов ведутся по номинальным напряжениям.

Коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений q зависит прежде всего от свойства материала, вида и формы надреза и является константой для данного материала. Для конструкционных сталей в среднем $q = 0,6 \div 0,8$. Для высокопрочных легированных сталей можно принимать $q \approx 1$. Из-за этого применение высокопрочных сталей для деталей с очагами резкой концентрации напряжений не всегда оказывается целесообразным. Нагрузки в известных границах способствуют значительному увеличению предела выносливости. Это является тренировкой материала и широко используется в технике, например, в процессе обкатки машин.

При одноосном напряженном состоянии расчет запаса прочности выполняется с помощью диаграмм предельных напряжений. Предполагая, что в процессе нагружения среднее напряжение σ_{np} и амплитуда цикла

σ_a изменяются пропорционально, т.е. $\frac{\sigma_a}{\sigma_m} = const$, вычисляется запас прочности

$$P_\sigma = \frac{\sigma_r}{\sigma_{\max}} : , \sigma_a : \left(\frac{\sigma_b}{P_\sigma} - \sigma_m \right) = \sigma_{-1} : \sigma_b ,$$

откуда

$$P_\sigma = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_v}{\sigma_b}} : \left(\sigma_a - \frac{\sigma_0}{2P_\sigma} \right) : \left(\frac{\sigma_0}{2P_\sigma} - \sigma_m \right) = \left(\sigma_{-1} - \frac{\sigma_m}{2} \right) : \frac{\sigma_0}{2} . \quad (5)$$

Обозначив $\frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} = \Psi_\sigma$, получим

$$P_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m} . \quad (6)$$

Поскольку коэффициент Ψ_σ характеризует чувствительность материала к асимметрии цикла при симметричном цикле $P_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a}$, формулы

(5) и (6) применимы лишь при расчете гладких образцов. При расчете деталей необходимо учесть все факторы, влияющие на прочность. В соответствии с этим амплитуда цикла номинального напряжения σ_a корректируется и вводится фактическая амплитуда напряжения

$$\frac{(K_\sigma)d}{(\varepsilon_\sigma)d} \sigma_a .$$

Тогда формулы (5) и (6) примут вид

$$P_{\sigma} = \frac{1}{\frac{(K_{\sigma})_d}{(\varepsilon_{\sigma})_d} \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b}} = \frac{1}{(K_{\sigma})_b \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b}}, \quad (7)$$

$$P_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{(K_{\sigma})_a}{(\varepsilon_{\sigma})_a} \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m} = \frac{\sigma_{-1}}{(K_{\sigma})_a \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m}. \quad (8)$$

Прочность сопротивления пластическим деформациям (по текучести) при циклах, когда усталостному разрушению может предшествовать остаточная деформация значительной величины, определяется по следующей формуле:

$$P_{T\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_T}{\sigma_m + \sigma_a}, \quad (9)$$

При циклическом кручении расчеты на прочность ведутся аналогичным способом, заменой в них σ на τ .

Двухосевое смещение напряженного состояния может быть представлено как результат наложения чистого сдвига и одиночного растяжения (сжатия). Если материал находится в одноосном напряженном состоянии ($\tau_a = 0$), то при числе сдвигов ($\sigma_a = 0$)

$$P_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a}, \quad (10)$$

$$P_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a}. \quad (11)$$

Используя (10) и (11), получим общий запас прочности

$$P = \frac{P_{\sigma} P_{\tau}}{\sqrt{P_{\sigma}^2 + P_{\tau}^2}}. \quad (12)$$

Если переменный режим нагружения характеризуется нагрузками $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_i$ (или напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_i$), каждая из которых имеет свое число оборотов в минуту $n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$ в течение $T_1, T_2, T_3, \dots, T_i$ часов, то уравнение кривой выносливости имеет степенной вид

$$\sigma_i^m N_i = \text{const} \quad \text{или} \quad Q_i^m N_i = \text{const}, \quad (13)$$

где $\sigma_i(Q_i)$ – предельное напряжение (нагрузки); N_i – общее число циклов $N_i = 60n_iT_i$; $m(m')$ – показатель степени, характеризующий наклон ветви кривой усталости (в логарифмической системе координат равный котангенсу угла наклона).

Для практических расчетов, когда напряжение пропорционально нагрузкам – $m = m'$, обычно принимают $m = 6 \div 9$.

Уравнение замены нагрузок $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_i, \dots$ в течение заданного для каждой нагрузки времени (суммирования повреждений от «усталостных» процессов, происходящих при этих режимах) и базового числа циклов нагружения N_0 имеет вид

$$(Q_1^{m'} n_1 T_1 + Q_2^{m'} n_2 T_2 + \dots) 60 = (K_1 Q_1)^{m'} N_0.$$

Тогда расчетная формула для коэффициента долговечности может быть представлена в виде

$$K = \sqrt[m']{\frac{60Tn_1}{N_0}} \sqrt[m']{\sum \left(\frac{Q_i}{Q_1} \right)^{m'} \frac{n_i}{n_1} \frac{T_i}{T}} \quad (14)$$

или

$$K = \sqrt[m']{\frac{60Tn_1}{N_0}} \sqrt[m']{\sum \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right)^{m'} \frac{n_i}{n_1} \frac{T_i}{T}}, \quad (15)$$

где T – общее (суммарное) время работы в часах.

В этих формулах первый множитель характеризует требуемый срок службы, второй – переменность режима.

Во многих механических передачах (зубчатых, червячных, фрикционных) вследствие высоких контактных переменных напряжений происходит разрушение в виде выкрашивания поверхностного контактного слоя. В этих конструкциях усилия передаются по ограниченной поверхности, и теоретически контакт до нагружения является точечным или линейным, вследствие чего возникающие при нагружении напряжения в зоне контакта могут быть весьма значительными. При превышении этими напряжениями допустимых значений могут образоваться трещины. Поскольку нагружение носит циклический характер, то возникающие напряжения являются переменными. Этим и объясняется характер развития трещин, что позволяет отнести их к категории усталостных разрушений. Кривые контактной выносливости напоминают обычные кривые выносливости, и связь между напряжением и числом циклов имеет вид

$$\sigma^m N = const \text{ или } Q^{m'} N = const.$$

Для типичных контактов (для подшипников качения) $m' = 3.3$ при расчете зубчатых передач $m = 6$. Для случая контакта шара с плоскостью

$$\sigma_{\max} = 0.62 \sqrt[3]{\frac{PE}{d^2}} \text{ кг/м}^2,$$

где d – диаметр шара, P – действующая нагрузка, E – приведенный модуль упругости

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2},$$

E_1 и E_2 – модули упругости материала шара и плоскости.

Заключение. Разработаны методики расчета напряженного состояния деталей машин с учетом наличия концентраторов и эксплуатационных условий.

¹ Институт механики НАН РА

² ЗАО «Электромаш ГАМ» НП ТЦ

e-mails: hamlet@mechins.sci.am, elektramash@mail.ru

Г. Г. Шемян, А. В. Геворкян

Критерии работоспособности и объемная прочность конструкционных элементов машин с концентраторами напряжений

Оценка прочности конструктивных элементов машин обычно весьма сложна и требует учета местных напряжений, которые могут значительно превышать допустимые, что обусловлено наличием различных концентраторов напряжений. Разрабатываются методы расчета напряженного состояния деталей машин с учетом наличия концентраторов и эксплуатационных условий.

Հ. Գ. Շեկյան, Ա. Վ. Գևորգյան

Լարումների կոնցենտրատորներով մեքենաների Կառուցվածքային տարրերի ծավալային ամրության և աշխատունակության չափանիշները

Մեքենաների կառուցվածքային տարրերի ամրության գնահատումը սովորաբար շատ բարդ է և պահանջում է տեղային լարումների հաշվառում, որոնք կարող են նշանակալի չափով գերազանցել թույլատրելի չափերը: Դա պայմանավորված է տարբեր կոնցենտրատորների առկայությամբ: Աշխատանքը ուղղված է կոնցենտրատորների և շահագործման պայմանների հաշվառմամբ մեքենաների դետալների լարվածային պայմանների հաշվարկային մեթոդիկայի մշակմանը:

H. G. Shekyan, A. V. Gevorkyan

**Performance Criteria and Bulk Strength of Structural Elements
of Machines with Stress Concentrators**

Assessing the strength of structural elements of machines is usually very difficult and requires taking into account local stresses, which can significantly exceed the allowable ones. This is due to the presence of various stress concentrators. The work is aimed at developing methods for calculating the stress state of machine parts, taking into account the presence of concentrators and operating conditions.

Литература

1. *Рябчиков А. В.* Коррозийная усталостная прочность сталей. М. Машгиз. 1953. 179 с.
2. *Орлов П. И.* Основы конструирования в 3-х книгах. М. Машиностроение. 1977. 574 с.
3. Справочник машиностроения. М. Машгиз. 1955. Т. 4. 482 с.
4. *Киммельман Д. Н.* Расчет деталей машин при переменных нагрузках. М. Машгиз. 1950. 150 с.
5. *Иванов М. Н., Финогенов В. А.* Детали машин. М. Юрайт. 2019. 408 с.

Член-корреспондент НАН РА С. О. Саркисян

Прикладные задачи статического поперечного изгиба и устойчивости листа графена

(Представлено 11/VI 2022)

Ключевые слова: *прямоугольный лист графена, континуально моментно-мембранная теория пластин, поперечный изгиб, статика, устойчивость.*

1. Введение. Методы механики деформируемого твердого тела получили широкое распространение в моделировании деформаций наноструктур. Построение континуальных моделей деформаций двумерных наноматериалов, в частности графена, является одной из современных проблем механики деформируемых твердых тел. Известно, что деформация кристаллических наноматериалов происходит по схеме «сдвиг плюс поворот» [1]. Обосновано также утверждение, что при изучении деформаций двумерных наноматериалов по континуальной теории необходимо использование трёхмерной моментной теории упругости с независимыми полями перемещений и вращений [2-4]. Указанные выше исследования открывали дорогу для решения проблемы разработки континуальной теории деформаций двумерных наноматериалов как адекватной теории пластин и оболочек по моментной теории упругости. Вначале была построена континуально-одномерная стержневая модель линейной атомной цепочки, в дискретной модели которой взаимодействием между атомами считаются силовое нецентрально-моментное [5]. С использованием построенной континуально-моментной стержневой модели, заменяя взаимодействие между атомами двумерного наноматериала стержневой системой, построена дискретно-континуальная его модель. На примере графена, далее, предельным переходом построены две континуальные модели его деформации: 1) модель плоского напряжённого состояния листа графена, 2) модель его поперечного изгиба, причём обе эти модели идентичны соответствующим моделям моментно-мембранной теории упругих пластин [6, 7]. Определены все шесть упругих постоянных моментной теории упругости для

материала графена. Таким образом, моментно-мембранные модели плоского напряжённого состояния и поперечного изгиба упругих пластин с уже известными упругими постоянными можно трактовать как континуальные модели для соответствующих деформаций листа графена. Эти построенные континуальные модели открывают широкую дорогу для постановки различных прикладных задач о деформациях листа графена.

В данной работе рассматриваются следующие прикладные задачи поперечного изгиба листа графена: 1) задача статического поперечного изгиба прямоугольного листа графена, когда он несёт поперечно распределённую нормальную нагрузку, а края его свободно опёрты; определены прогиб листа, а также действующие в нём усилия и моменты; 2) задача устойчивости для первоначально сжатого состояния листа графена; определена критическая нагрузка.

2. Основные уравнения и граничные условия моментно-мембранной теории упругих тонких пластин. Для изучения деформаций листа графена по континуальной теории от общих уравнений и соотношений моментно-мембранной теории упругих тонких оболочек [6, 7] перейдем к частной теории – теории пластин. В итоге для пластин получим две отдельные теории: 1) модель плоского напряженного состояния моментно-мембранной теории упругих тонких пластин, 2) модель поперечного изгиба моментно-мембранной теории упругих тонких пластин. По этим моделям можем по отдельности изучать деформацию листа графена в своей плоскости и изгибной деформации от своей плоскости.

1) Основные уравнения плоского напряженного состояния моментно-мембранной теории упругих тонких пластин, выраженные в декартовых координатах (x, y) , получим из общих уравнений и соотношений теории оболочек [6, 7]:

$$\begin{aligned} & \text{уравнения равновесия (движения)} \\ & \frac{\partial T_{11}}{\partial x} + \frac{\partial S_{21}}{\partial y} = \rho_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - (p_1^+ - p_1^-), \quad \frac{\partial S_{12}}{\partial x} + \frac{\partial T_{22}}{\partial y} = \rho_0 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} - (p_2^+ - p_2^-), \\ & \frac{\partial L_{13}}{\partial x} + \frac{\partial L_{23}}{\partial y} + (S_{12} - S_{21}) = J_0 \frac{\partial^2 \Omega_3}{\partial t^2} - (m_3^+ - m_3^-); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{геометрические соотношения} \\ & \Gamma_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad \Gamma_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial y}, \quad \Gamma_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x} - \Omega_3, \\ & \Gamma_{21} = \frac{\partial u_1}{\partial y} + \Omega_3, \quad k_{13} = \frac{\partial \Omega_3}{\partial x}, \quad k_{23} = \frac{\partial \Omega_3}{\partial y}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{физические соотношения упругости} \\ & T_{11} = \frac{2Eh}{1-\nu^2} (\Gamma_{11} + \nu \Gamma_{22}), \quad T_{22} = \frac{2Eh}{1-\nu^2} (\Gamma_{22} + \nu \Gamma_{11}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{12} &= (\mu + \alpha) \cdot 2h[\Gamma_{12} + \eta\Gamma_{21}], \\ S_{21} &= (\mu + \alpha) \cdot 2h[\Gamma_{21} + \eta\Gamma_{12}], \end{aligned} \quad (3)$$

$$L_{13} = 2Bhk_{13}, \quad L_{23} = 2Bhk_{23}, \quad \eta = \frac{\mu - \alpha}{\mu + \alpha}, \quad B = \frac{4\gamma\varepsilon}{\gamma + \varepsilon}.$$

Запишем граничные условия, например, вдоль края $y = \text{const}$:

а) статические граничные условия

$$T_{11} = \bar{T}_{11}, \quad S_{12} = \bar{S}_{12}, \quad L_{13} = \bar{L}_{13}, \quad (4)$$

б) геометрические граничные условия

$$u_1 = \bar{u}_1, \quad u_2 = \bar{u}_2, \quad \Omega_3 = \bar{\Omega}_3. \quad (5)$$

Могут иметь место также смешанные граничные условия. Отметим, что в литературе [8] известна указанная модель плоской деформации пластинки по моментной теории упругости с независимыми полями перемещений и вращений.

Сведем исходные уравнения и соотношения (1)-(3) модели плоского напряженного состояния моментно-мембранной теории упругих тонких пластин к разрешающим уравнениям. Подставив (2) в (3) и затем в уравнения равновесия (1), получим систему разрешающих уравнений относительно функций $u_1(x, y), u_2(x, y), \Omega_3(x, y)$:

$$\begin{aligned} (\lambda' + 2\mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) + (\mu + \alpha) \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 u_2}{\partial x \partial y} \right) + 2\alpha \frac{\partial \Omega_3}{\partial y} &= -p_1, \\ (\lambda' + 2\mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) + (\mu + \alpha) \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_1}{\partial x \partial y} \right) - 2\alpha \frac{\partial \Omega_3}{\partial x} &= -p_2, \quad (6) \\ B\Delta\Omega_3 - 4\alpha\Omega_3 + 2\alpha \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} - \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) &= -m_3, \end{aligned}$$

где

$$\lambda' = \frac{2\lambda\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{E\nu}{1-\nu^2}, \quad \Delta(\cdot) = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial y^2}, \quad (7)$$

Система уравнений (6) дополняется граничными условиями (4) или (5).

2) Основные уравнения и граничные условия модели поперечного изгиба моментно-мембранной теории упругих тонких пластин, которые следуют из общих уравнений и граничных условий теории тонких оболочек [6, 7], приведем в декартовой системе координат (x, y) , считая, что на пластинку действует только нормально к её срединной **плоскости** распределённая нагрузка $p_3^+ - p_3^- = p_3$:

уравнения равновесия (движения)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_{13}}{\partial x} + \frac{\partial N_{23}}{\partial y} &= 2\rho_0 h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - p_3, \\
\frac{\partial L_{11}}{\partial x} + \frac{\partial L_{21}}{\partial y} + N_{23} &= 2J_0 h \frac{\partial^2 \Omega_1}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial L_{12}}{\partial x} + \frac{\partial L_{22}}{\partial y} - N_{13} &= 2J_0 h \frac{\partial^2 \Omega_2}{\partial t^2};
\end{aligned} \tag{8}$$

физические соотношения упругости

$$\begin{aligned}
N_{13} &= 2G^* h \Gamma_{13}, \quad N_{23} = 2G^* h \Gamma_{23}, \quad G^* = \frac{4\mu\alpha}{\mu + \alpha}, \\
L_{11} &= 2h \frac{2\gamma}{\beta + 2\gamma} [2(\beta + \gamma)k_{11} + \beta \cdot k_{22}], \\
L_{22} &= 2h \frac{2\gamma}{\beta + 2\gamma} [2(\beta + \gamma)k_{22} + \beta \cdot k_{11}], \\
L_{12} &= 2h[(\gamma + \varepsilon)k_{12} + (\gamma - \varepsilon)k_{21}], \\
L_{21} &= 2h[(\gamma + \varepsilon)k_{21} + (\gamma - \varepsilon)k_{12}];
\end{aligned} \tag{9}$$

геометрические соотношения

$$\begin{aligned}
\Gamma_{13} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_2, \quad \Gamma_{23} = \frac{\partial w}{\partial y} - \Omega_1, \\
k_{11} &= \frac{\partial \Omega_1}{\partial x}, \quad k_{22} = \frac{\partial \Omega_2}{\partial y}, \quad k_{12} = \frac{\partial \Omega_2}{\partial x}, \quad k_{21} = \frac{\partial \Omega_1}{\partial y};
\end{aligned} \tag{10}$$

Статические граничные условия, например, вдоль края $y = const$, выражаются в виде

$$N_{13} = \bar{N}_{13}, \quad L_{11} = \bar{L}_{11}, \quad L_{12} = \bar{L}_{12}, \tag{11}$$

а геометрические граничные условия – в виде

$$w = \bar{w}, \quad \Omega_1 = \bar{\Omega}_1, \quad \Omega_2 = \bar{\Omega}_2. \tag{12}$$

Могут иметь место также смешанные граничные условия.

Сведем исходные уравнения и соотношения (8)-(10) модели поперечного изгиба моментно-мембранной теории упругих тонких пластин к разрешающим уравнениям. Подставляя (10) в (9) и затем в уравнения равновесия (8), получим систему дифференциальных уравнений относительно функций $w(x, y), \Omega_1(x, y), \Omega_2(x, y)$:

$$\begin{aligned}
\Delta w + \left(\frac{\partial \Omega_2}{\partial x} - \frac{\partial \Omega_1}{\partial y} \right) &= -\frac{p_3}{D_*}, \\
\Delta \Omega_1 + \nu_m \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Omega_1}{\partial x} + \frac{\partial \Omega_2}{\partial y} \right) + \frac{D_*}{D'} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \Omega_1 \right) &= 0, \\
\Delta \Omega_2 + \nu_m \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Omega_1}{\partial x} + \frac{\partial \Omega_2}{\partial y} \right) - \frac{D_*}{D'} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_2 \right) &= 0.
\end{aligned} \tag{13}$$

где

$$D_* = 2G^*h, \quad D' = 2h(\gamma + \varepsilon), \quad \nu_m = 2 \frac{\gamma - \varepsilon}{\gamma + \varepsilon}. \tag{14}$$

При получении системы разрешающих уравнений модели изгиба моментно-мембранной теории упругих тонких пластин была учтена формула [5]

$$\beta = \frac{\gamma - \varepsilon}{\gamma + \varepsilon} \cdot 2\gamma. \tag{15}$$

Легко заметить, что система уравнений модели изгиба моментно-мембранной теории упругих тонких пластин с математической точки зрения графически идентична системе уравнений изгибной деформации упругих тонких пластин типа Тимошенко [9].

При сложных граничных условиях (например, когда пластинка, в данном случае лист графена, ослаблена отверстиями или имеются трещины, вырезы, включения) целесообразно систему уравнений (13) модели изгиба моментно-мембранной теории упругих тонких пластин привести к системе из двух уравнений – бигармоничной задаче и уравнению Гельмгольца. Для этого продифференцируем второе уравнение из (13) по y , а третье – по x и, вычтя из полученного первого уравнения второе, получим

$$(k\Delta - 1) \left(\frac{\partial \Omega_2}{\partial x} - \frac{\partial \Omega_1}{\partial y} \right) = \Delta w, \tag{16}$$

где

$$k = \frac{D'}{D_*}. \tag{17}$$

Используя первое уравнение из системы (13), а также уравнение (16) относительно прогиба $w(x, y)$, приходим к уравнению

$$\Delta \Delta w = \frac{p_3}{D'} - \frac{1}{D_*} \Delta p_3. \tag{18}$$

Следуя [9], введем функции ψ и φ с помощью формул

$$\Omega_1 = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \Omega_2 = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y}, \tag{19}$$

где функция φ выражается через w и p_3 :

$$\varphi = -w - \frac{D'}{D_*} \Delta w - \frac{D'}{D_*^2} p_3. \quad (20)$$

Два последних уравнения из (13) будут удовлетворены, если функция ψ удовлетворяет уравнению Гельмгольца

$$\Delta \psi - \tilde{k}^2 \psi = 0, \quad (21)$$

где

$$\tilde{k}^2 = \frac{D_*}{(1 + \nu_m) D'}. \quad (22)$$

Таким образом, система разрешающих уравнений модели поперечного изгиба моментно-мембранной теории упругих тонких пластин, в данном случае изгиба листа графена от своей плоскости, имеет вид

$$D' \Delta \Delta w = p_3 - k \Delta p_3, \quad \Delta \psi - \tilde{k}^2 \psi = 0, \quad (23)$$

Усилия и моменты выражаются через функции w, ψ , имея в виду формулы (9), (10), (19). Можно показать, что если пластинка по всему внешнему контуру шарнирно опёрта, то функция $\psi \equiv 0$.

3. Упругие постоянные моментно-мембранной теории плоского напряжённого состояния и поперечной изгибной деформации пластин для графена. В [5] после определения потенциальной энергии деформации графена при плоском напряжённом состоянии и при поперечной изгибной деформации эти выражения сравниваются с соответствующими выражениями моментно-мембранной континуальной теории упругих пластин и в итоге определяются упругие постоянные моментно-мембранной континуальной теории пластин (при двух указанных деформациях) через физические параметры графена в дискретной его модели.

Таким образом, в плоском напряжённом состоянии моментно-мембранной теории упругих пластин для упругих постоянных материала графена имеем [5]:

$$\begin{aligned} E_* &= 2Eh = 287 \frac{H}{\text{м}}; \quad \mu_* = 2\mu h = 116 \frac{H}{\text{м}}; \quad \alpha_* = 2\alpha h = 42 \frac{H}{\text{м}}; \quad \nu = 0,24, \\ B_* &= 2Bh = 5,05 \cdot 10^{-10} H \cdot \text{нм}. \end{aligned} \quad (24)$$

В случае поперечной изгибной деформации упругие постоянные моментно-мембранной теории пластин для графена следующие [5]:

$$D_* = 2G_* h = 86 \frac{H}{M}, D' = 2h(\gamma + \varepsilon) = \gamma^* + \varepsilon^* = 4,15 \cdot 10^{-10} H \cdot нм,$$

$$D'' = 2h(\gamma - \varepsilon) = \gamma^* - \varepsilon^* = -0,91 \cdot 10^{-10} H \cdot нм, \nu_m = 2 \frac{D''}{D'} = -0,41, \nu = 0. \quad (25)$$

4. Задача статического поперечного изгиба прямоугольного листа графена. Рассмотрим пример статического поперечного изгиба листа графена, занимающего область прямоугольника: $0 \leq x \leq a_1, 0 \leq y \leq a_2$. Будем считать, что контур графена шарнирно опёрт. Для граничных условий имеем:

$$\begin{aligned} x = 0, a_1 : \quad w = 0, L_{12} = 0, \Omega_1 = 0; \\ y = 0, a_2 : \quad w = 0, L_{21} = 0, \Omega_2 = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Рассмотрим загрузку листа графена поперечной нагрузкой вида

$$p_3(x, y) = p_0 \sin \frac{\pi x}{a_1} \sin \frac{\pi y}{a_2}. \quad (27)$$

Решение системы уравнений (13) зададим в виде:

$$w(x, y) = w_0 \sin \frac{\pi x}{a_1} \cdot \sin \frac{\pi y}{a_2}, \Omega_1 = \Omega_{10} \sin \frac{\pi x}{a_1} \cdot \cos \frac{\pi y}{a_2}, \Omega_2 = \Omega_{20} \cos \frac{\pi x}{a_1} \cdot \sin \frac{\pi y}{a_2}. \quad (28)$$

Здесь множители $w_0, \Omega_{10}, \Omega_{20}$ подлежат определению. Отметим, что при помощи (28) будут удовлетворяться поставленные граничные условия (26).

Для определения w_0, Ω_{10} и Ω_{20} следует (28) подставить в систему уравнений (13), в результате чего придём к решению алгебраической линейной неоднородной системы уравнений. Если $p_0 = 10^6 \frac{H}{M^2}$, $a_1 = a_2 = 20 нм$, то для максимального прогиба листа графена получим

$$w_0 = \frac{p_0 a_1^2}{2\pi^2 \tilde{D}'} \left(1 + \frac{\tilde{D}'}{D_*} \right) = 1,17 нм,$$

где

$$\tilde{D}' = \frac{D'}{a_1^2} \cdot 2\pi^2.$$

5. Задача устойчивости первоначально сжатого состояния листа графена. Определение критической нагрузки. Пусть имеем прямоугольную пластинку (лист графена), у которой все стороны опёрты; по двум сторонам $x = 0, x = a_1$ равномерно распределены нормальные

сжимающие усилия p (величина усилия на единицу длины). Требуется определить критическое значение усилий $p_{кр}$, при котором плоская форма равновесия перестаёт быть единственной и устойчивой формой (пластинка теряет устойчивость).

До потери устойчивости напряжённое состояние пластинки является плоским. Для этого состояния необходимо иметь в виду статические уравнения равновесия (1) ($p_1^\pm = p_2^\pm = m_3^\pm = 0$) и граничные условия:

$$x = 0, a_1, T_{11} = -p, S_{21} = 0, L_{23} = 0; \quad y = 0, a_2, T_{22} = 0, S_{12} = 0, L_{13} = 0.$$

Эта граничная задача решается в области срединной плоскости пластинки $0 \leq x \leq a_1, 0 \leq y \leq a_2$:

$$T_{11}(x, y) = p, \quad T_{22}(x, y) \equiv 0, \quad S_{12}(x, y) \equiv 0, \quad S_{21}(x, y) \equiv 0, \quad L_{13}(x, y) \equiv 0, \quad L_{23}(x, y) \equiv 0.$$

Приведем систему уравнений изогнутой поверхности:

уравнения равновесия

$$\frac{\partial N_{13}}{\partial x} + \frac{\partial N_{23}}{\partial y} = p \frac{\partial^2 w}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial L_{11}}{\partial x} + \frac{\partial L_{21}}{\partial y} + N_{23} = 0,$$

$$\frac{\partial L_{12}}{\partial x} + \frac{\partial L_{22}}{\partial y} - N_{13} = 0;$$

(29)

соотношения упругости выражаются уравнениями (9), а геометрические соотношения – уравнениями (10).

Систему уравнений (9), (10), (29) можно привести к виду

$$\begin{cases} \Delta w + \frac{\partial \Omega_2}{\partial x} - \frac{\partial \Omega_1}{\partial y} = \frac{p}{D_*} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \\ \Delta \Omega_1 + \nu_m \left(\frac{\partial^2 \Omega_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Omega_2}{\partial x \partial y} \right) + \frac{D_*}{D'} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \Omega_1 \right) = 0, \\ \Delta \Omega_2 + \nu_m \left(\frac{\partial^2 \Omega_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Omega_1}{\partial x \partial y} \right) - \frac{D_*}{D'} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_2 \right) = 0. \end{cases} \quad (30)$$

Необходимо найти решение системы однородных уравнений (30), отличное от нуля и удовлетворяющее граничным условиям на сторонах пластинки.

В случае граничных условий шарнирного опирания (26), как в предыдущем случае, после введения функций $\varphi(x, y)$ и $\psi(x, y)$ по формулам (19), система уравнений (30) приведет к решению уравнений относительно w :

$$\Delta\Delta w + \frac{p}{D'} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{p}{D_*} \cdot \frac{\partial^2 (\Delta w)}{\partial x^2} = 0. \quad (31)$$

Решение этого уравнения представим в виде

$$w = w_0 \sin \frac{m\pi x}{a_1} \cdot \sin \frac{n\pi y}{a_2}, \quad (32)$$

где w_0 – постоянный коэффициент, а m и n – целые числа.

Подставив (32) в (31) и учитывая, что нас интересует решение, неравное нулю, получим все значения p , соответствующие значениям $m=1,2,3,\dots, n=1,2,3,\dots$, при которых становится возможным искривление вида (32). Из всей совокупности значений p наименьшее и будет критическим.

Если, в частности, рассматривать квадратную пластинку $a_1 = a_2$, когда $m = n = 1$, для критической нагрузки получим

$$p_{кр} = \frac{\frac{4\pi^2 D'}{a_1^2}}{1 + \frac{D'}{D_*} \cdot \frac{2\pi^2}{a_1^2}}.$$

При $a_1 = 20 \text{ нм}$, $p_{кр} = 0,04 \frac{H}{м}$.

6. Заключение. Модели плоского напряженного состояния и поперечного изгиба моментно-мембранной теории пластин с вычисленными упругими постоянными представлены как двумерные континуальные модели деформаций листа графена. Такие прикладные модели открывают большие возможности для постановки и решения различных задач изгиба и устойчивости листа графена с применением аппарата математической физики

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта № 21Т-2С093

Ширакский государственный университет
e-mail: s_sargsyan@yahoo.com

Член-корреспондент НАН РА С. О. Саркисян

**Прикладные задачи статического поперечного
изгиба и устойчивости листа графена**

На основе ранее разработанной континуальной моментно-мембранной теории для описания деформаций двумерных наноматериалов (в том числе и графена) рассматриваются две прикладные задачи для прямоугольного листа графена: 1) статического поперечного изгиба, 2) устойчивости первоначально сжатого состояния. При решении первой задачи определены функции перемещения и свободных поворотов; при решении второй – критическая нагрузка.

ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Ս. Հ. Մարգարյան

**Գրաֆենի շերտի ստատիկ լայնական ծռման և կայունության
կիրառական խնդիրները**

Նախօրոք կառուցված երկչափ նանոնյութերի (այդ թվում նաև գրաֆենի) դեֆորմացիաների նկարագրության կոնտինուալ մոմենտամեմբրանային տեսության հիման վրա ուղղանկյուն գրաֆենային շերտի համար դիտարկվում են երկու կիրառական խնդիրներ՝ 1) լայնական ստատիկական ծռման խնդիրը, 2) նրա սկզբնական սեղմման վիճակի կայունության խնդիրը: Գրաֆենի շերտի լայնական ստատիկական ծռման խնդրի դեպքում որոշվում են տեղափոխության և ազատ պտույտների ֆունկցիաները; իսկ գրաֆենի շերտի սկզբնական սեղմման վիճակի կայունության խնդրի դեպքում՝ որոշվում է կրիտիկական ուժի մեծությունը:

Corresponding member of NAS RA S. H. Sargsyan

**Applied Problems of Static Transverse Bend and
Stability of a Graphene Sheet**

In the paper, based on the previously developed continuous moment-membrane theory which describes the deformations of two-dimensional nanomaterials (including graphene), two applied problems are considered for a rectangular graphene sheet: 1) the problem of the static transverse bend, 2) the problem of stability of its initial compressed state. The functions of displacement and free rotations are determined for the problem of the static transverse bend of the graphene sheet. In the case of the problem of stability of the initially compressed state of a graphene sheet, the critical load is determined.

Литература

1. Панин В.Е., Гриняев Ю. В., Егорушкин В. Е. – Изв. РАН. МТТ. 2010. № 4. С. 8-29.
2. Иванова Е. А., Кривцов А. М., Морозов Н. Ф и др. – ДАН России. 2003. Т. 391. № 6. С. 764-768.

3. *Иванова Е. А., Кривцов А. М., Морозов Н. Ф.* – ПММ. 2007. Т. 71. Вып. 4. С. 595-615.
4. Современные проблемы механики. Механические свойства ковалентных кристаллов. Уч. пособие. /Беринский И.Е. [и др.]; под общ. ред. Кривцова А. М., Лобода О. С. СПб. Изд-во Политехн. ун-та. 2014. 160 с.
5. *Саркисян С. О.* – Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. № 2. С. 109-121.
6. *Саркисян С. О.* – Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 4. С. 13-19.
7. *Саркисян С. О.* – Вестн. Моск. ун-та. Серия 1. Математика. Механика. 2022. № 1. С. 38-47.
8. *Морозов Н. Ф.* Математические вопросы теории трещин. М. Наука. 1984. 256 с.
9. *Пелех Б. Л.* Концентрация напряжений около отверстий при изгибе трансверсально-изотропных пластин. Киев. Наукова думка. 1977. 183 с.

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.3-207

**Дж. К. Карапетян, А. С. Гаспарян, С. Р. Шахпаронян,
Г. М. Матевосян, Р. К. Карапетян, А. С. Шахпаронян**

Сейсмический датчик для систем мониторинга. Разработка и результаты

(Представлено чл.-кор. НАН РА С. М. Оганесяном 4/IX 2022)

Ключевые слова: *землетрясение, сейсмический сигнал, портативный сейсмический датчик, сейсмоприемник, спектральный анализ.*

Введение. Задача повышения качества массовых сейсмологических наблюдений решается путем оснащения наблюдательных сейсмометрических и инженерно-сейсмометрических пунктов и станций приборами нового поколения. Это дает возможность проведения на высоком уровне мониторинга (регистрация и анализ землетрясений, микроземлетрясений и т.д.) урбанизированных территорий, особо значимых объектов, зданий и сооружений [1-6]. Модели сейсмологических приборов, разработанные и изготовленные до 1990-х гг., уже не справляются с возросшими к ним требованиями. За последние годы обновилась элементная база электронных компонент, появились новые возможности информационных технологий и усовершенствованных конструкций, в том числе механических элементов подвеса вертикальных и горизонтальных сейсмометров [7-16]. В Институте геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА (ИГИС НАН РА) проводятся работы по модернизации существующих сейсмометров и созданию армянских отечественных, значительно более дешевых уникальных сейсмических приборов, имеющих относительно простые конструкции и способных заменить дорогостоящие зарубежные аналоги.

Короткопериодный сейсмический датчик. В 1975 г. В. А. Токмаковым был разработан сейсмоприемник СМ-3, до сих пор широко используемый как в сейсмологических, так и инженерных исследованиях. Сейсмоприемник СМ-3 предназначен для преобразования механических колебаний в колебания электрического тока и может использоваться для изме-

рения вертикальных и горизонтальных колебаний в различных системах. СМ-3 имеет плавную настройку собственной частоты до 0.5 Гц, термокомпенсатор для вертикального варианта сейсмометра и обладает возможностью несложной перестройки с вертикального на горизонтальный вариант и обратно [17]. Согласно некоторым американским источникам сейсмоприемник СМ-3 используется в качестве эталона для калибровки сейсмических инструментов [18]. Основными недостатками сейсмоприемника СМ-3 являются: большой вес, большие габаритные размеры, трудности регулировки при эксплуатации, нестабильность нулевого положения, низкий коэффициент затухания собственных колебаний маятника.

Авторами настоящей работы обобщен опыт лучших отечественных разработок, проанализированы достижения и проблемы современной сейсмометрии и создан наиболее экономически целесообразный новый сейсмоприемник – модернизация СМ-3. Цель модернизации – уменьшение веса, увеличение коэффициента затухания, упрощение конструкции, улучшение эксплуатационных характеристик, обеспечение стабильности нулевого положения прибора.

Вес СМ-3 составляет 7.7 кг. Он содержит более 30 высокоточных деталей, изготовление которых требует высококвалифицированной рабочей силы и специальной оснастки, в то время как модернизированная версия прибора, получившая название IGES-006, весит менее 1 кг и содержит менее 10 деталей, для изготовления которых не требуется никаких специальных высокоточных производств.

При эксплуатации СМ-3 в полевых условиях возникают следующие неудобства: для настройки прибора необходимо открывать крышку, разарретировать, устанавливать нулевое положение маятника и снова закрывать крышку. После закрывания крышки через некоторое время меняется температура внутри прибора, что приводит к изменению нулевого положения маятника. В связи с этим возникает необходимость неоднократной повторной корректировки. При использовании прибора в составе сети, состоящей из множества датчиков, процесс настройки становится трудоемким, изнурительным и требует много времени. У модернизированного датчика IGES-006 улучшены эксплуатационные характеристики. Разарретирование и установка маятника в нулевое положение производятся без открывания крышки прибора.

Разработанный сейсмометр предназначен для модернизации существующих национальных сетей сейсмологических и инженерно-сейсмометрических наблюдений как на территории Армении, так и за рубежом [3]. Датчик размещен в корпусе, в котором установлены колеблющийся маятник с инерционной массой и катушка, расположенная на одной оси с инерционной массой. Датчик имеет также магнит, расположенный на корпусе соосно катушке, и медный сердечник. Конструктивно сейсмоприемник представляет собой маятник инерционного типа с собственным периодом, регулируемым до 3 с.

Сейсмоприемник помещается в герметичный корпус с выходным разъемом для соединения с блоком регистрации. Разработаны три варианта сейсмоприемника: с периодами собственных колебаний маятника 1.0, 1.5 и 2.5 с. Коэффициент затухания маятников критический. Установка маятника в нулевое положение производится без вскрытия крышки прибора. Инерционные массы и катушка уравновешены относительно оси колебания маятника, что дает возможность отказаться от применения спиральных пружин. Это, в свою очередь, исключает температурную нестабильность сейсмического датчика. У сейсмометра СМ-3 с изменением температуры маятник меняет положение своего равновесия, так как при изменении температуры жесткость пружины в основном меняется вследствие изменения ее упругих свойств [17].

Для выяснения термостабильности сейсмоприемника СМ-3 и модернизированного датчика IGES-006 проведены совместные лабораторные температурные испытания. При температуре +50°С смещение маятника СМ-3 составляло 10 мм, у IGES-006 смещения маятника не наблюдалось. Необходимость использования пружин для установки маятника в нулевое положение отпадает.

Основные характеристики сейсмометра IGES-006 приведены в табл. 1.

Таблица 1

№	Характеристика	Размерность	Значения
1	Рабочий частотный диапазон	Гц	0.3–50
2	Неравномерность амплитудно-частотной характеристики в рабочем диапазоне частот	дБ	±3
3	Номинальный коэффициент преобразования	в с/м	30
4	Затухание	-	1
5	Габариты сейсмоприемника (одна компонента)	Мм	70×70×60
6	Вес одного сейсмоприемника, не более	Кг	0.5
7	Габариты блока контроля	Мм	205×150×70
8	Масса блока контроля	Кг	1.1
9	Рабочий температурный диапазон	С	-30...+50
10	Относительная влажность при температуре окружающего воздуха 25°С		80%

Результаты измерений в режиме сейсмического мониторинга. IGES-006 успешно прошел лабораторные и полевые испытания и был рекомендован для тестового использования в режиме мониторинга, в частности, на станциях региональных сейсмических сетей в районах с повышенной сейсмической опасностью.

Для тестирования в режиме мониторинга в период с 30 сентября по 2 октября 2019 г. в Республике Северная Осетия-Алания (Российская Федерация) датчик IGES-006 был установлен на двух сеймостанциях с цифровыми блоками управления (во Владикавказе и в поселке Кармадон), которые входят в сейсмическую сеть Геофизического института ВНИИ РАН. После установки сейсмоприемников IGES-006 в районе Западного Кавказа 24.10.2019 г. произошло землетрясение со следующими очаговыми параметрами: 2019-10-24 15:41:41, широта 43.12, долгота 44.57, глубина 15 км, mb: 3.4/4, которое было зарегистрировано приборами СПВ-3К и IGES-006, установленными на станциях «Владикавказ» и «Кармадон». На рис. 1 и 2 приведены записи горизонтальной компоненты X и соответствующие спектры волновых форм землетрясения 24.10.2019 г., записанные приборами IGES-006 (а) и СПВ-3К (б).

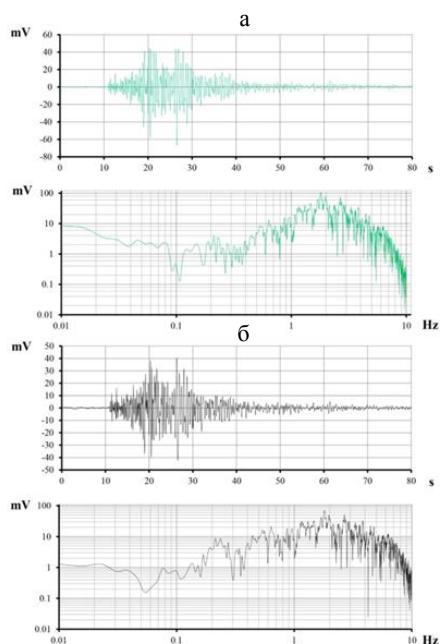


Рис. 1. Записи горизонтальной компоненты X землетрясения 24.10.2019 г. на станции «Кармадон» и соответствующие спектры волновых форм: а – IGES-006, б – СПВ-3К.

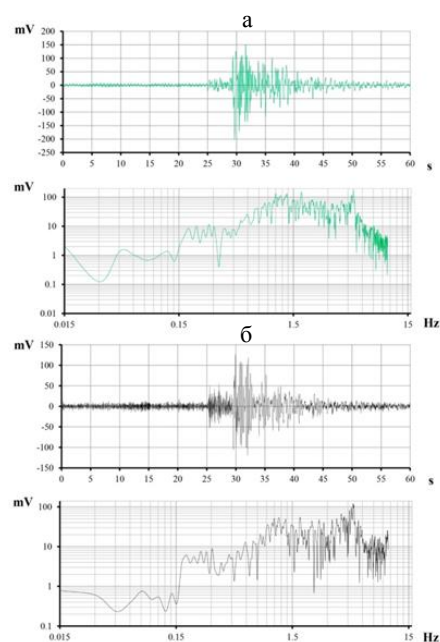


Рис. 2. Записи горизонтальной компоненты X землетрясения 24.10.2019 г. на станции «Владикавказ» и соответствующие спектры волновых форм: а – IGES-006, б – СПВ-3К.

Сравнительный анализ показывает, что наблюдается хорошее соответствие волновых форм и спектров записей с датчиков IGES-006 и СПВ-3К, однако первое вступление волновых форм более ярко выделяется на записи IGES-006 (рис. 1, 2). На записи СПВ-3К наблюдаются повышенные

(примерно в 2 раза) амплитуды фона, которые можно интерпретировать как аппаратный шум (рис. 2). Значения преобладающих периодов в общем случае совпадают: $T=0.37$ с и $T=0.55$ с (рис. 1 – записи землетрясения станцией «Кармадон» и соответствующие спектры волновых форм). Значения преобладающих периодов на спектрах датчиков IGES-006 и СПВ-3К также совпадают: $T=0.20$ с и $T=0.57$ с (рис. 2 – записи землетрясения станцией «Владикавказ» и соответствующие спектры волновых форм). Однако есть некоторые различия при сравнении спектральных плотностей (рис. 1, 2).

Для демонстрации соответствия записей землетрясения на рис. 3, 4 приведены сопоставления волновых форм и соответствующих спектров с сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К на станциях «Кармадон» и «Владикавказ».

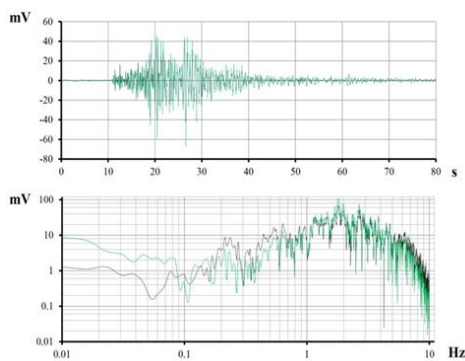


Рис. 3. Сопоставление волновых форм и спектров записей с сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К на станции «Кармадон»,

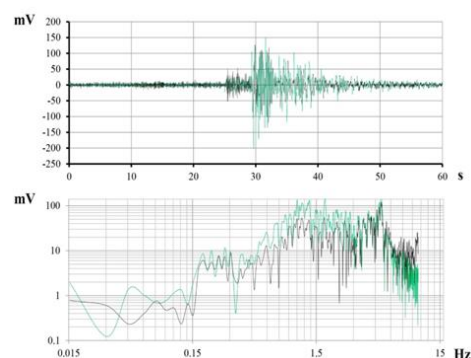


Рис. 4. Сопоставление волновых форм и спектров записей с сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К на станции «Владикавказ».

Сопоставительный анализ показывает хорошее соответствие волновых форм и по времени, и по амплитуде. Однако есть некоторые различия амплитудных значений, которые, по-видимому, связаны с разной чувствительностью сейсмоприемников IGES-006 и СПВ-3К (рис. 3, 4).

В табл. 2 приведены количественные параметры (Peak Ground Velocity-PGV) колебаний грунта (с записей сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К), а также рассчитаны некоторые интегральные (Velocity Spectrum Intensity-VSI, Cumulative Absolute Velocity-CAV) параметры как более стабильные энергетические параметры сейсмического воздействия [19, 20].

Сравнительная оценка параметров из табл. 2 показывает, что на записях IGES-006 максимальные амплитуды по сравнению со значениями на записях прибора СПВ-3К в 1.59 раза больше (станции «Кармадон» и «Владикавказ»). Это, по-видимому, связано с разной чувствительностью приборов.

Таблица 2

	«Кармадон»		«Владикавказ»	
	IGES-006	СПВ-3К	IGES-006	СПВ-3К
T_1	0.5554	0.5554	0.5699	0.5749
ω_1	1.8005	1.8005	1.7548	1.7395
T_2	0.3745	0.3745	0.1998	0.2004
ω_2	2.6703	2.6703	5.0049	4.9896
PGV	66.9337	42.1953	201.9528	126.5613
ASI	59.4310	45.5519	171.7707	117.4456
CAV	365159.0086	278974.9051	706490.0571	531466.8229

На расстоянии 22 км от эпицентра максимальная амплитуда на записи IGES-006 станции «Кармадон» составляет 66.9 мВ, а на записи IGES-006 станции «Владикавказ» – 201.9 мВ, т.е. в 3 раза меньше. При этом отношение эпицентральных расстояний станций «Владикавказ» и «Кармадон» равно 2.4. Отношение значений интегральных параметров, в частности CAV, составляет 1.9. Те же значения получились при сравнении соответствующих параметров на записи СПВ-3К станций «Кармадон» и «Владикавказ». Отношения значений интегральных параметров, в частности ASI, которое описывает спектральный состав, рассчитанных по записям СПВ-3К и IGES-006, составляют, соответственно, 2.6 и 2.9. Т. е. при изменении расстояния в 2.4 раза максимальная амплитуда меняется в 3 раза, а параметр CAV меняется в 1.9 раза, что более правдоподобно, поскольку CAV учитывает не только волновую форму, но и длительность записи и, по сути, представляет собой энергетический параметр и ведет себя более стабильно. На рис. 5 и 7 представлены микросейсмы перед землетрясением на станциях «Кармадон» и «Владикавказ» и соответствующие спектры.

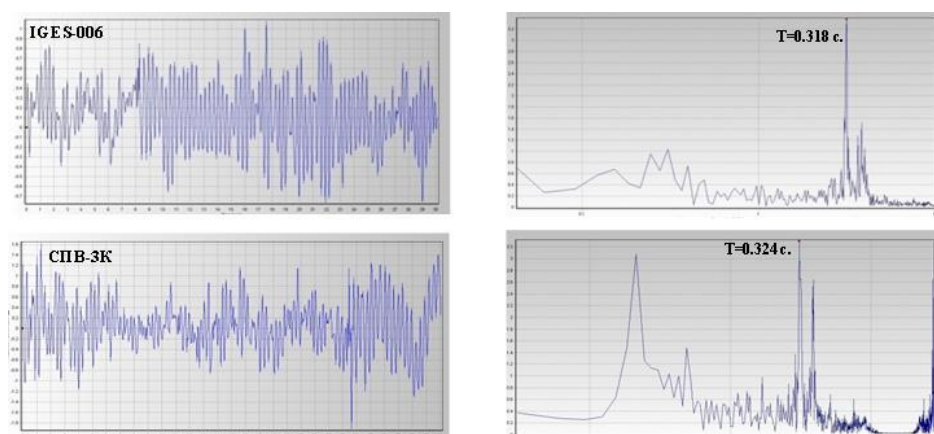


Рис. 5. Микросейсмы перед землетрясением, записанные на станциях «Кармадон», и их соответствующие спектры.

Микросейсмы после землетрясения, записанные на станциях «Кармадон» и «Владикавказ» и соответствующие спектры представлены на рис. 6 и 8.

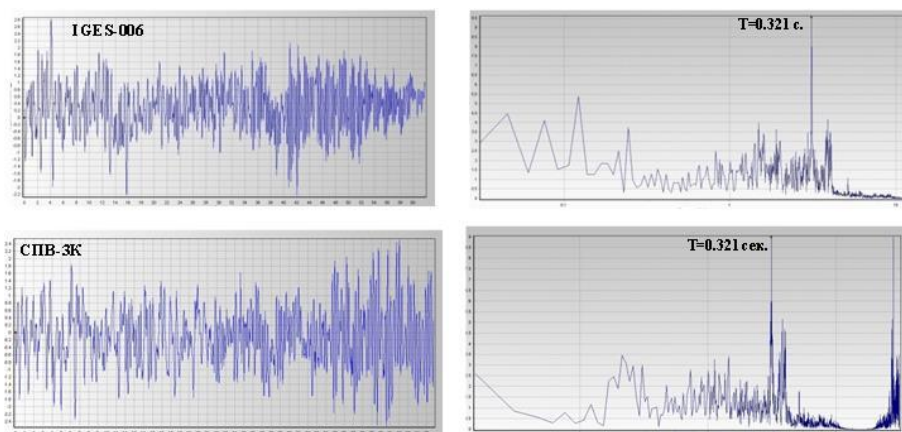


Рис. 6. Микросейсмы после землетрясения, записанные на станции «Кармадон», и их соответствующие спектры.

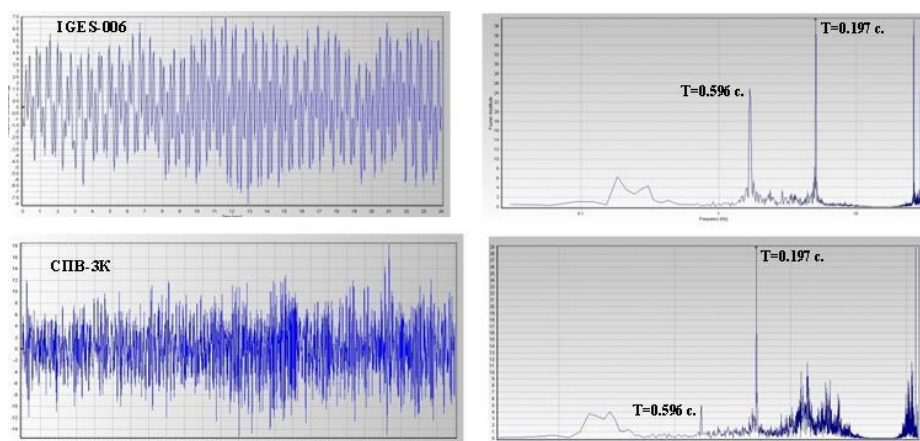


Рис. 7. Микросейсмы перед землетрясением, записанные на станции «Владикавказ», и их соответствующие спектры.

Анализ спектров микросейсм до и после землетрясений показывает, что значения преобладающих периодов на спектрах датчиков IGES-006 и СПВ-3К в основном совпадают – $T=0.32$ с на станции «Кармадон», $T=0.197$ с на станции «Владикавказ», однако на спектрах микросейсм датчика IGES-006 наблюдается ярко выраженный пик при периоде $T=0.596$ с, который и виден на спектре микросейсм датчика СПВ-3К до землетрясения.

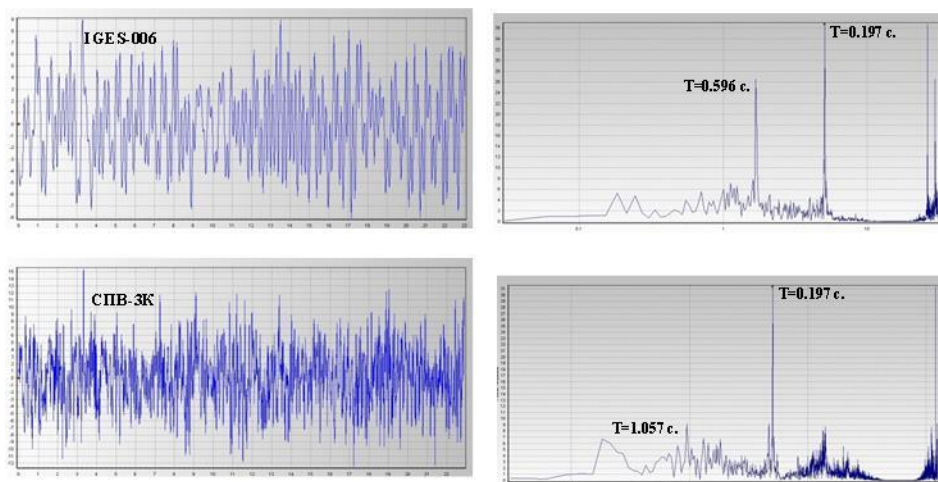


Рис. 8. Микросейсмы после землетрясения, записанные на станции «Владикавказ» и их соответствующие спектры.

При сравнении волновых форм микросейсм и их спектров до и после землетрясения на станциях «Кармадон» и «Владикавказ» наблюдается некоторая закономерность по изменениям амплитудного состава (рис. 5-8), в частности, после землетрясений наблюдаются сравнительно повышенные значения спектральных амплитуд.

Из табл. 2 видно, что во всех случаях на спектрах наблюдается преобладающий период 0.56 с, который, по-видимому, является основным характерным периодом данного землетрясения. Для подтверждения результатов в дальнейшем по мере накопления большого количества микросейсм землетрясений имеет смысл исследовать микросейсмы до и после основного толчка землетрясения.

Вывод. Разработан малогабаритный датчик для систем мониторинга, отвечающий самым высоким современным требованиям – короткопериодный сейсмодатчик с периодами собственных колебаний маятника 1.0, 1.5 и 2.5 с. Его амплитудно-частотная характеристика соответствует велосиметру и имеет максимально плоский участок в полосе 0.3-50 Гц. Макет сейсмодатчика успешно прошел лабораторные и полевые испытания, в том числе и в режиме сейсмического мониторинга.

Проведенные совместные испытания портативных сейсмодатчиков IGES-006 и СПВ-3К свидетельствуют о хорошей согласованности характеристик сейсмического процесса, зарегистрированных независимо обоими приборами.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что малогабаритные короткопериодные сейсмоприемники могут заменить крупногабаритные и более дорогие датчики.

Реализованные технологии обеспечивают более дешевую альтернативу для развития средств массовых сейсмических наблюдений в Армении

по сравнению с существующими зарубежными программами модернизации сетей сейсмического мониторинга.

Разработанный авторами компактный короткопериодный сейсмометр IGES-006 предназначен для модернизации сейсмологических и инженерно-сейсмометрических наблюдений, региональных и локальных геодинамических исследований, регистрации сейсмических событий на земной поверхности.

Внедрение прибора в практику сейсмических наблюдений позволит:

1. обеспечить независимость отечественных исследований от зарубежных поставок;
2. поднять уровень отечественного геофизического приборостроения;
3. сэкономить средства на импортозамещении;
4. участвовать в международных проектах по модернизации мировой глобальной сети сейсмических наблюдений.

Авторы выражают благодарность руководству Геофизического института – филиалу Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (ГФИ ВНИЦ РАН) за предоставленную возможность размещения приборов на станциях «Владикавказ» и «Кармадон».

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке Республики Армения в рамках научных проектов № АСН-01/22, 21SCG-1E021.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии
им. А. Назарова НАН РА
e-mail: iges@sci.am

**Дж. К. Карапетян, А. С. Гаспарян, С. Р. Шахпаронян,
Г. М. Матевосян, Р. К. Карапетян, А. С. Шахпаронян**

Сейсмический датчик для систем мониторинга. Разработка и результаты

Представлен разработанный в Институте геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА сейсмический короткопериодный датчик IGES-006. Датчик предназначен для использования как в составе различных систем сейсмического мониторинга, так и для решения специальных инженерных задач. Макет датчика успешно прошел лабораторные и полевые испытания, в том числе в режиме сейсмического мониторинга. Проведен сравнительный анализ сейсмических сигналов, зарегистрированных с использованием датчиков IGES-006 и СПВ-3К, во временной и частотной областях.

**Ջ. Կ. Կարապետյան, Ա. Ս. Գասպարյան, Ս. Ռ. Շահպարոնյան,
Գ. Մ. Մաթևոսյան, Ռ. Կ. Կարապետյան, Հ. Ս. Շահպարոնյան**

**Սեյսմիկ տվիչ մշտադիտարկման համակարգերի համար:
Մշակում և արդյունքներ**

Ներկայացված է ՀՀ ԳԱԱ Ա. Նազարովի անվ. երկրաֆիզիկայի և ինժեներային սեյսմաբանության ինստիտուտի կողմից մշակված ճոճանակային IGES-006 սեյսմիկ տվիչը: Տվիչը նախատեսված է ինչպես երկրաշարժերի մշտադիտարկման, այնպես էլ տարբեր ոլորտներում վիբրոչափումների իրականացման համար: Սեյսմիկ տվիչը հաջողությամբ անցել է ինչպես լաբորատոր, այնպես էլ դաշտային փորձարկումներ, այդ թվում նաև փորձարկումներ մշտադիտարկման պայմաններում: Անցկացվել է IGES-006 և SPV-3K տվիչների օգտագործմամբ ժամանակային և հաճախական ոլորտներում ստացված սեյսմիկ ազդանշանների համեմատական վերլուծություն:

**J. K. Karapetyan, A. S. Gasparyan, S. R. Shakhparonyan,
G. M. Matevosyan, R. K. Karapetyan, H. S. Shakhparonyan**

**Seismic Sensor for Monitoring Systems.
Development and Results**

The short-period seismic sensor IGES-006 developed at the NAS RA Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov is presented. The IGES-006 sensor can be used both as part of various seismic monitoring systems and for solving special engineering problems. The sensor prototype has successfully passed laboratory and field tests, including the seismic monitoring mode. A comparative analysis of seismic signals recorded using IGES-006 and sensors in the time and frequency domains have been carried out.

Литература

1. Dzeboev B. A., Soloviev A. A., Dzeranov B. V. *et al.* – Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2019. V. 19. ES6005. DOI: 10.2205/2019ES000691.
2. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A. *et al.* – Earth Sci. Rev. 2020. 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
3. Karapetyan J.K., Li Li - Acta Geologica Sinica (English Edition), 95(supp. 1): 55–58. 2021, <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14831>.
4. Karapetyan J. K., Sargsyan R. S., Ghazaryan K. S. *et al.* – Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20. DOI:10.2205/2020ES000709.
5. Karapetyan J. K. – Geoinformatics Research Papers. V. 5. BS1002, <https://doi.org/10.2205/CODATA2017>, 2017 102 of 172.
6. Karapetyan J. K. 2018. In: Proc. of International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan Earthquake with The 4th International Conference on Continental Earthquakes (The 4th ICCE) and The 12th General Assembly of

- the Asian Seismological, May 12-14, 2018, Chengdu, Sichuan, China, the 4th ICCE-0000000904. 2018. P. 908-916
7. *Васильев И. М., Кожевников Ю. П., Матвеев И. В. и др.* – Наука и технологические разработки. 2016. Т. 95. № 4. С. 5-10. DOI: 10.21455/std2016.4-1.
 8. *Рыков А. В.* – Физика Земли. М. Наука, 1992. С.76-80.
 9. *Рыков А. В.* – Сейсмические приборы. 2002. Вып. 37, 24-37.
 10. *Саркисян В. К.* – Изв. НАН Армении. Техн. науки. 2010. Т. 63, № 3. С.313-318.
 11. *Саркисян Р. Е.* – Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 39-41.
 12. *Сидорин А. Я.* – Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 77-80.
 13. *Karapetyan J.* In: Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological Commission Sebastiano D'Amico, Galea P., Bozionelos G., Colica E. et al. (Eds.). 2-7 September 2018 I Valletta- Malta. 2018. ESC2018-S2-926.
 14. *Karapetyan J. K.* In: American Geophysical Union, AGU100, Washington D.C., 10-14 Dec 2018, S13C-0459.
 15. *Karapetyan J. K., Karapetyan R. K.* In: American Geophysical Union, AGU100, San Francisco CA, 9-13 December 2019, S41G-0604.
 16. *Karapetyan J., Gasparyan A.* In: 30 years after the Spitak earthquake: experience and perspectives. International conference. December 03-07, 2018, Yerevan, Armenia. Conf. program, Abstracts volume. P. 67-68.
 17. *Токмаков В. А.* – Сейсмические приборы. 1975. Вып. 8. С. 14-18.
 18. *Mackey K., Burk D., Chalyu K.* In: The proceedings of scientific works of the conference is dedicated to the 70th Anniversary of National Academy of Sciences. 2013. P. 73-77.
 19. *Григорян В. Г., Карапетян Дж. К.* – Строительная механика и расчет сооружений. 2008. № 3. С. 59-63.
 20. *Карапетян Дж. К.* – Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39. № 3. С. 33-40.

BIOTECHNOLOGY

УДК 579

DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.3-218

Foreign member of NAS RA V. A. Sakanyan¹,
M. A. Iradyan², N. S. Iradyan²

Development of Targeted EGFR Degradation for Cancer Treatment

(Submitted 31/V 2022)

Keywords: *cancer therapy, EGFR, allosteric degraders, Bim phosphorylation, glutamine, anoikis.*

Introduction. The main distinguishing hallmarks of cancer are self-sustaining growth signals, insensitivity to growth inhibition signals, tissue invasion and metastasis, unlimited ability to replicate, and prevention of cell death [1]. In the fight against cancer, two main principles of small molecule therapy have been developed: standard therapy and targeted therapy. Standard chemotherapeutic agents are cytotoxic because they kill cancer cells, while targeted chemotherapeutic agents are often cytostatic because they bind to tumor cells and block cell proliferation. Targeted cancer treatment requires reliable information about human genes and proteins; therefore, it became the cornerstone of precision medicine for almost three decades.

Transmembrane receptor tyrosine kinases (RTKs) control various signaling pathways that play a pivotal role in the regulation of cell proliferation, motility, survival, and cell death [2]. Mutations that disrupt the functions of the intracellular kinase domain of the epidermal growth factor receptor (EGFR) are often associated with the onset and progression of cancer (Fig. 1). Target-specific small molecules and neutralizing antibodies have been designed to inhibit proliferative phosphorylation in signaling pathways triggered by RTKs in cancer cells. Targeting the ATP binding site in RTK is an important issue in medicinal chemistry for the treatment of EGFR-associated cancer [3]. Tyrosine kinase inhibitors (TKIs) with reversible and irreversible mechanisms of action have been developed to inhibit the catalytic site, improving patient survival compared to platinum-based chemotherapy, the previous standard of care [4].

However, resistance mutations leading to cancer progression have been described that include not only mutations in EGFR, but also those located outside the receptor gene and affecting HER2/HER3 amplification, mesenchymal epithelial transition factor (MET) amplification, the phosphoinositide 3-kinase (PI3K) pathway, mitogen-activated RAS protein kinase pathway (MAPK), and modification of cell cycle genes. Thus, the bottleneck of inhibitory chemotherapy targeting EGFR is the acquisition of multiple mutations in the same tumor, leading to drug resistance and unexpected side effects that reduce the effectiveness of TKIs.

In recent years, promising approaches have been developed aimed at targeted protein degradation rather than inhibition of the catalytic site [5]. The popular method of proteolysis-targeted chimeras (PROTAC) is based on the use of heterobifunctional degraders containing two linked moieties, one of which binds to the protein of interest, and the other binds to the E3 ligase [6]. The E3 ligase-degrader-protein complex results in polyubiquitination of the target protein and its subsequent degradation by the ubiquitin-proteasome system, after which the proteolysis-targeting chimera is recycled to target another copy of the protein of interest.

We have developed an alternative method for targeted degradation of EGFR by polyfunctionalized heterocyclic compounds, namely 4-allyl-5-[2-(4'-alkoxyphenyl)quinolin-4-yl]-4H-1,2,4-triazole-3-thiols, which bind to the receptor and lead to cell detachment from the extracellular matrix [7]. In this review, we highlight the processes that occur when compounds bind to EGFR and ultimately lead to cancer cell death. We suggest that targeted protein degradation holds great promise for improving the treatment of EGFR-associated cancer by overcoming the shortcomings of current TKI-based therapies.

Targeting EGFR in cancer. Post-translational modifications and protein-protein interactions directly modulate EGFR signaling and trafficking. A clue to understanding the inhibition of the tyrosine kinase activity of EGFR by TKIs is the finding that the driving force that activates the ATP-binding site is the action of hydrogen peroxide (H_2O_2) that is generated during cognate ligand EGF binding to the receptor [8]. The binding of EGF to EGFR promotes the transformation of O_2 to H_2O_2 through the membrane-located NADPH oxidase Nox2; then, this reactive oxygen species reacts with Cys797, leading to the transition of the thiolate anion (Cys-S) to sulfenic acid (Cys-SOH), which is required for the activation of the ATP-binding site in the receptor [9].

Ligand-independent auto-phosphorylation of EGFR has been also described in cells treated with small molecules. In particular, the action of 4-nitrobenzoxadiazole derivatives rely on the generation of H_2O_2 by cytoplasmic superoxide dismutase in cancer cells [10]. Overall, this finding suggests that the highly reactive hydrogen peroxide produced by various metabolic reactions may unpredictably increase phosphorylation flux in EGFR-driven pathways and thus reduce the therapeutic efficacy of TKIs [11]. Below, we describe the properties of new generation of small molecules that overcome the disadvantages of H_2O_2 producing molecules when binding to the tyrosine kinase domain of EGFR.

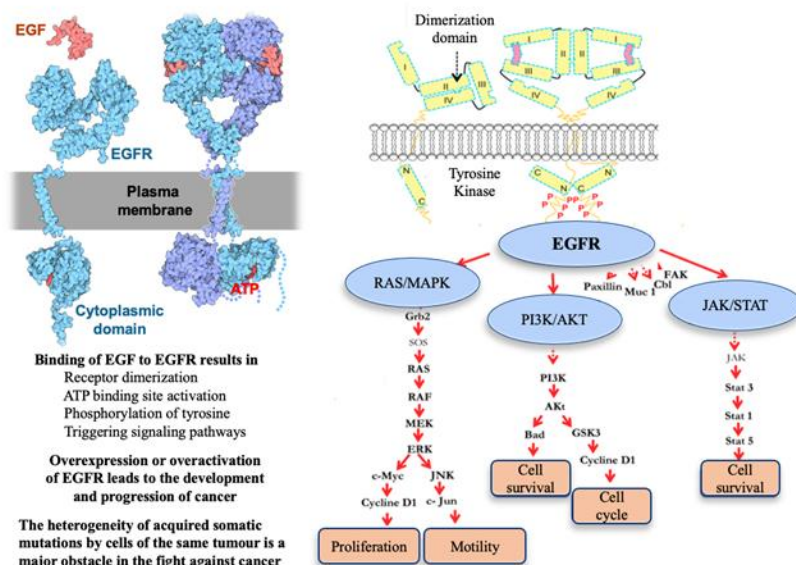


Fig. 1. Structure of monomeric and dimeric forms of EGFR and functions of the EGF ligand-bound receptor in cells.

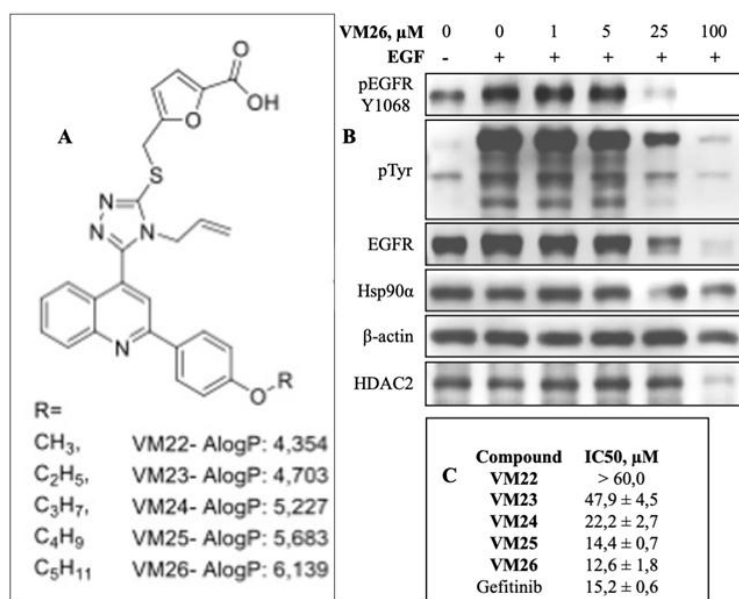


Fig. 2. Targeted protein degradation in cancer cells with polyfunctionalized heterocyclic compounds. **A** – furfuryl derivatives of 4-allyl-5-[2-(4'-alkoxyphenyl)quinolin-4-yl]-4H-1,2,4-triazole-3-thiol; **B** – compound **VM26** shows dose-dependent degradation of EGFR and other proteins and reduced phosphorylation mediated by EGFR in MDA MB68 cancer cells; **C** – the cytotoxicity of compounds (IC₅₀) in MDA MB468 cancer cells grown with fetal bovine serum for 72 hours.

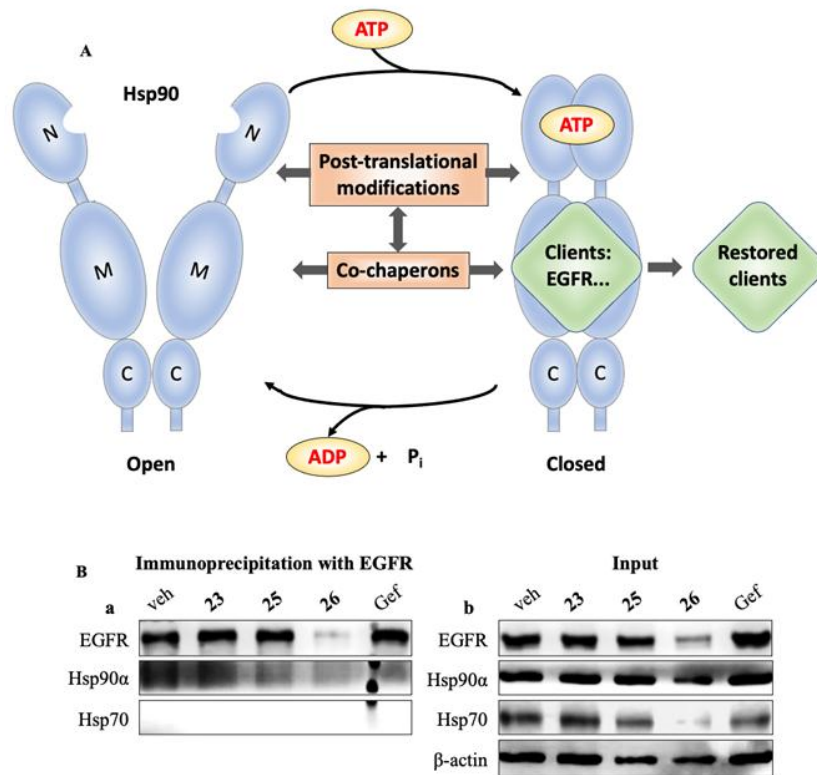


Fig. 3. Molecular structure and function domain of Hsp90α bound to EGFR. **A** – Activation of client proteins by the Hsp90α chaperone. Hsp90α in the open conformation dimerizes in the C-domain, and ATP binding leads to a conformation change to the closed form. Upon ATP hydrolysis, Hsp90α returns to the open conformation and is ready to start another chaperone cycle, regulated by cochaperone proteins. **B** – Hsp90α protein immunoprecipitated with anti-EGFR mAb (**a**), and input protein samples (**b**). Serum-starved MDA MB468 cells were treated with 25 μM **VM23**, **VM25**, **VM26**, or Gefetinib for 2 h. The proteins were collected on protein G conjugated to magnetic beads.

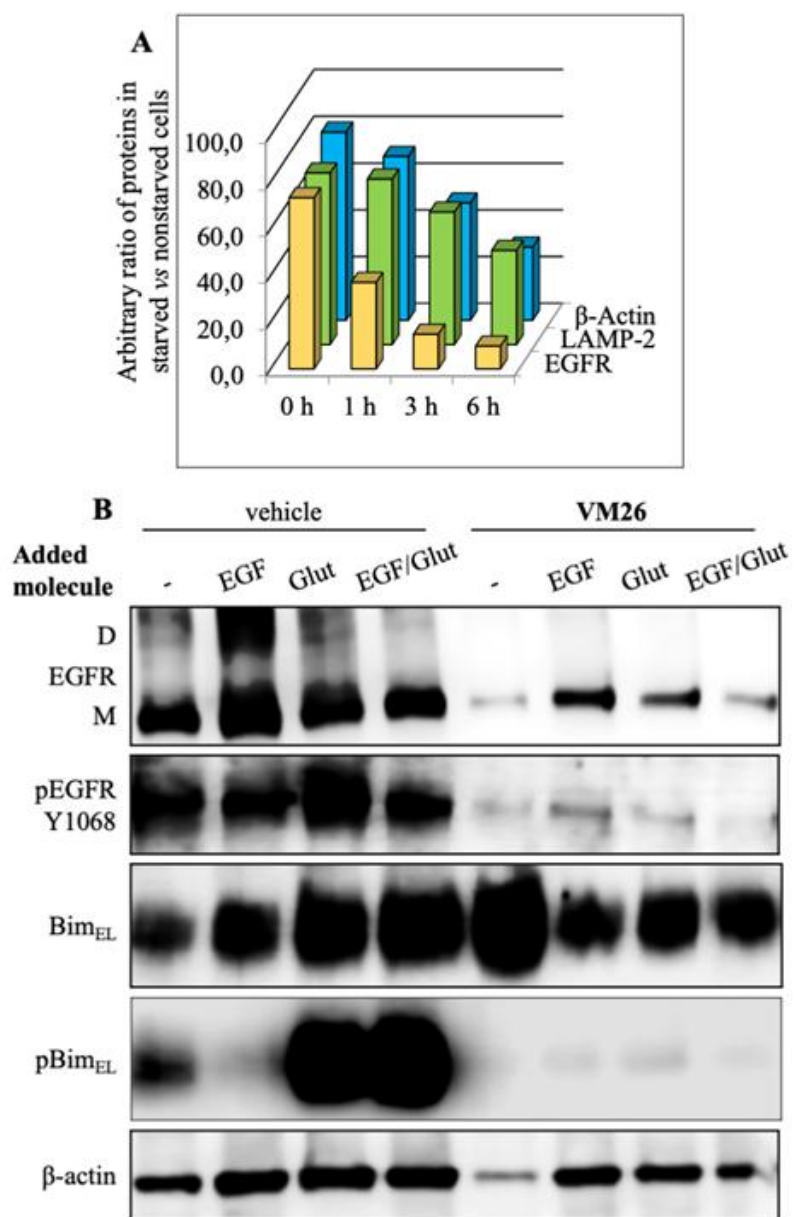


Fig. 4. Sequestration of Bim in MDA MB468 cancer cells by allosteric degraders of EGFR. **A** – Two step protein degradation in starved cells vs nonstarved cells considering 100% of each protein in nonstarved cells. Relative levels of proteins were estimated as their ratio. **B** – Impact of EGF and glutamine on protein expression and phosphorylation in untreated cells and treated with 25 μ M VM26 for 6 h in serum-deprived medium.

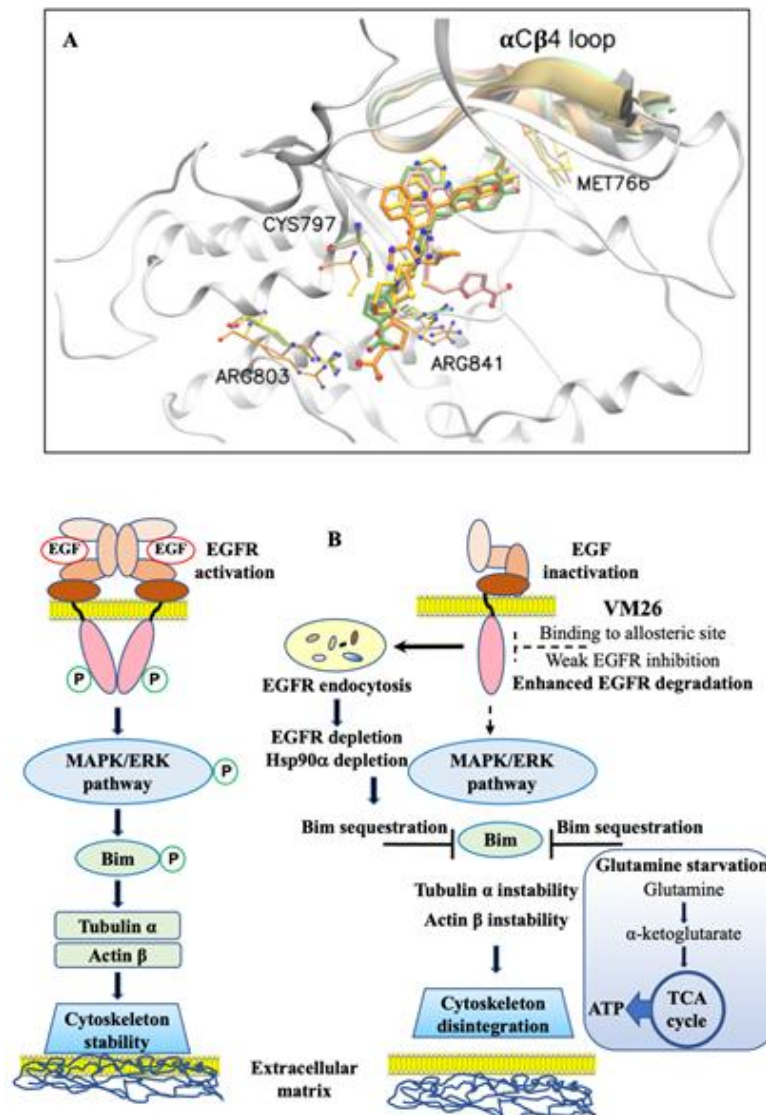


Fig. 5. Mechanism of action of EGFR-specific allosteric degraders on cancer cells. **A** – Structure of EGFR bound to **VM3** (orange), **VM25** (pink), and **VM26** (green) and Gefitinib (yellow). **B** – Compound **VM26** binds to a hydrophobic allosteric site in EGFR, inducing degradation of the receptor in endosomes. Depletion of EGFR, possibly with Hsp90 α , leads to sequestration of Bim, followed by disintegration of the cytoskeleton and detachment of cancer cells from the extracellular matrix. Glutamine starvation causes a deficiency of α -ketoglutarate and an inability of cells to replenish the tricarboxylic acid (TCA) cycle and produce ATP. Double starvation of EGF and glutamine reinforces the cytoskeleton disintegration leading to cancer cell detachment-promoted death.

Endocytotic degradation of EGFR. Protein degradation in mammals depends on the initiation type of autophagy categorized as macro-autophagy, chaperone-mediated, and micro-autophagy [12]. Endocytosis of EGFR is a micro-autophagy process, which orchestrates cellular signaling networks, and can direct the fate of the receptor in cells. Ligand-bound EGFR undergoes endocytosis followed by recycling and/or degradation of the receptor by proteolytic enzymes in lysosomes fused to endosomes [13]. Low doses of EGF activate clathrin-dependent endocytosis, which promotes sustained EGFR signaling and is the main mechanism of EGFR endocytosis in tumors in vivo [14]. High doses of ligand additionally induce clathrin-independent endocytosis, which is the main lysosomal degradation pathway for reducing EGFR signaling [15]. Apparently, this process affects the fate of the receptor through ubiquitination at saturated concentrations [16].

We have synthesized furfuryl derivatives of 4-allyl-5-[2-(4'-alkoxyphenyl)quinolin-4-yl]-4H-1,2,4-triazole-3-thiol by combining various scaffolds in one molecule [7]. Alkyl ether substituents of different lengths were attached to the benzene ring to obtain new **VM** compounds that provide a differential increase in the sensitivity of the target protein to the action of proteases (Fig. 2A). The triple negative breast cancer cell line MDA MB468, in which the EGFR protein is overexpressed compared to a low-expressing ErbB2 counterpart, was used in our study. Experiments showed a significant suppression of EGFR tyrosine phosphorylation associated with a decrease in its expression due to protein degradation (Fig. 2B). The ability of the active compounds to simultaneously suppress tyrosine phosphorylation and to reduce EGFR levels and other functionally unrelated proteins suggested that the small molecules induce protein degradation by first targeting EGFR in cancer cells. Active **VM** compounds **VM25** and **VM26** demonstrated relatively high cytotoxicity comparable to gefitinib (Fig. 2C), a well-known first-generation anti-EGFR drug [17].

We assessed protein levels in serum-deprived cells in which EGFR expression was reduced by siRNA silencing [7]. Decreased levels of EGFR and Hsp90 α were observed when cells were exposed to **VM** compounds compared to cells transfected with scrambled siRNA. We also evaluated the autophagy biomarkers LC3 α /LC3 β , considering that the accumulation of LC3 β correlates with an increase in the number of autophagosomes, which degrade nutrient-starved proteins in cells [18]. Immunofluorescence microscopy was used to study autophagy biomarkers in the cells incubated with a lower concentration of compounds for a shorter time [7]. The LC3 β protein emitted a strong fluorescent signal upon exposure to **VM26** relative to the vehicle, indicating the compound resulted in a rapid response of the autophagy mechanism.

Chaperone HSP90 α promotes autophagic degradation of EGFR. Heat shock proteins (HSPs) play a crucial role in the process of protein folding during proliferation, invasion, metastasis, and death of cancer cells. Among these proteins, HSP90 α , a highly conserved molecular chaperone, has over 700 protein substrates known as client proteins [19]. HSP90 α is involved in a variety of cellular processes beyond protein folding, which include DNA repair,

immune response development, and neurodegenerative diseases. Other co-chaperones interact with HSP90 α and regulate ATPase-associated conformational changes in the HSP90 α dimer that occur during processing of client proteins (Fig. 3A). Therefore, this chaperone plays a key role in correcting the misfolding of client proteins and protecting them from ubiquitination and degradation by the 26S proteasome [20].

EGFR is a client protein for Hsp90 α that in cooperation with Hsp70 controls and edits the proper folding and maturation of nascent polypeptides via a super-chaperone complex in normal and cancer cells [21]. The chaperone Hsp70 initially recognizes a misfolded client protein and then translocates the bound protein to Hsp90 α , which promotes the maturation of the client protein [22]. The α C β 4 loop in EGFR moderately conserved in client protein kinases is likely to be recognized by Hsp90 α [23]. The chaperone Hsp90 α is highly expressed in cancer cells, and diminution of the Hsp90 machinery activity leads to the degradation of misfolded client proteins by cellular proteasome.

We studied the effect of **VM** compounds on the interaction of EGFR with Hsp90 α by immunoprecipitation. The analysis showed that the 90-kDa Hsp90 α diffuse band could be immunoprecipitated with EGFR from cell extracts treated with the three compounds, with the lowest chaperone yield in samples corresponding to **VM26** treatment (Fig. 3Ba). No band corresponding to Hsp70 was detected in immunoprecipitated extracts, whereas a 70-kDa protein was detected in input samples and at lower levels in cells exposed to compounds **VM25** and especially **VM26** (Fig. 3Bb). This means that the final chaperone-target protein complex does not contain Hsp70, which dissociated after providing for EGFR translocation to Hsp90 α . A lower amount of Hsp90 α in samples precipitated with anti-EGFR antibody indicates simultaneous degradation of the chaperone in the EGFR- Hsp90 α complex due to binding of the **VM** compound. Obviously, a decrease in EGFR folding should promote greater degradation of the receptor protein, which may lead to a decrease in the phosphorylation flux in downstream signaling pathways.

Detachment of cancer cells from the extracellular matrix. The cytoskeleton consists of actin polymers and microtubules formed by tubulin polymers, which in concert with other proteins allow integrins to attach to the extracellular matrix [24]. EGFR phosphorylation status in downstream signaling pathways determines the functional state of integrins, which are transmembrane receptors that mediate cell adhesion to the extracellular matrix. Crucially, EGFR governs the normal functioning of the cytoskeleton through the MAPK/ERK pathway by phosphorylation of the proapoptotic Bim, a sensor protein important for interaction with microtubules [25]. Interruption of this signaling pathway by blocking Bim phosphorylation leads to the sequestration of the cytoskeleton and the detachment of healthy cells. Nutrient starvation impairs the EGFR signaling cascade, leading to the detachment of cells and ultimately to a programmed death pathway known as anoikis. Compared with healthy cells, cancer cells possess a higher tolerance to anoikis, and this seems to be involved in the metastatic progression of inflammatory tumors.

We observed that incubation of cancer cells with **VM** compounds reduced levels of β -actin and α -tubulin, cytoskeletal proteins commonly used as loading controls in Western blotting [7]. In addition, the compounds caused detachment of cancer cells from the extracellular matrix, especially under conditions of cell starvation for EGF or glutamine. Only traces of EGFR were detected in attached cells, and the receptor protein was absent in detached cells after exposure to the compounds in serum-supplemented medium.

To determine whether the destabilization of the cytoskeletal machinery is related to the status of the Bim sensor protein, protein expression was assessed by immunofluorescence imaging and Western blotting. Kinetic analyzes showed a transient and significant increase in Bim_{EL} after one hour of exposure to **VM26** in a serum-deprived medium, followed by a decrease in this protein level after three hours of exposure. Notably, a high level of Bim_{EL} expression was associated with a decrease in the amount of EGFR after one hour. The amount of lysosomal protease LAMP-2 and cytoskeletal protein β -actin decreased later compared to EGFR. This two-speed decrease in the abundance of functionally unrelated proteins (Fig. 4A) seems to reflect two processes: early and rapid degradation of EGFR by endocytosis, followed by slower disintegration of the cytoskeleton due to Bim sequestration.

To elucidate which major nutritional factors are involved in Bim induced sequestration, protein profiles were compared in serum-deprived cultures after addition of EGF or glutamine or both for 6 hours. Glutamine and its mixture with EGF and, to a lesser extent, EGF increased Bim_{EL} expression compared to vehicle or EGF alone (Fig. 4B). Moreover, a significant increase in the rate of phosphorylation was detected in Ser69 Bim_{EL}, which is likely due to increased phosphorylation at Tyr1068 in EGFR. Replenishment of the medium with a fresh portion of glutamine improved the functional state of Bim in the absence of **VM** compounds.

Serum-deprived cells treated with **VM26** in the presence of EGF, glutamine, or both had elevated expression levels of EGFR, LAMP-2, β -actin, and cleaved caspase 3 compared to low protein expression in the presence of compound alone (Fig. 4B). Bim_{EL} expression essentially increased after exposure to **VM26**, and no noticeable modulation was detected after the addition of EGF, glutamine, or both in the starved culture. Notably, **VM26** strongly suppressed Ser69 phosphorylation in Bim_{EL}, apparently associated with reduced phosphorylation in EGFR, regardless of the addition of EGF, glutamine, or both to the growth medium.

Targeted degradation of the receptor protein is of particular interest in prostate cancer. The traditional treatment for this cancer, which eventually develops into a castration-resistant form with a poor prognosis for patients, is androgen deprivation. Standard methods of radiation therapy, chemotherapy, hormonal therapy, and surgery are not considered fully effective in the treatment of advanced and metastatic forms of cancer. We evaluated **VM** compounds in the DU-145 prostate cancer cell line, characterized by an unusual decrease in EGFR levels in response to EGF action in an autocrine loop,

presumably associated with endocytosis [26]. Depletion of EGFR by **VM26** for three hours resulted in a decrease in BimEL expression and Ser69 phosphorylation in attached cells, which was associated with a larger number of cells detached from the extracellular matrix [7]. After a 24-hour incubation, **VM26** resulted in the disappearance of EGFR and β -actin in attached cells, regardless of the addition of EGF or glutamine to the starvation medium.

These results confirmed that **VM** compound-induced EGFR depletion drastically destabilizes the cytoskeleton, leading to detachment of cancer cells from the extracellular matrix and, ultimately, death resembling apoptotic anoikis. Depletion of HSP90 α , which depends on the amount of chaperon-bound EGFR, can additionally contribute to cell detachment by reducing the ability of the Hsp90/Hsp70 system to properly fold a huge number of nutrient-prone proteins. Thus, both misfolded client proteins and nutrient-prone proteins can become targets for proteases in the endolysosomes and cytoplasm of cells treated with polyfunctional heterocyclic compounds.

Why does glutamine increase the anticancer capacity of EGFR degraders? Our data demonstrate the ability of allosteric degraders of EGFR to influence metabolic and energy balance in glutamine-deprived cancer cells. How does glutamine deficiency enhance **VM26** ability to kill cancer cells?

Cancer cells grow rapidly and require more energy for protein synthesis than normal cells. Glutamine is converted to α -ketoglutarate, which merges with the tricarboxylic acid cycle to form large amounts of ATP. Moreover, EGFR requires ATP to activate the catalytic ATP-binding site and more than thirty amino acids, including seven tyrosine residues, even if the receptor undergoes endocytosis [27]. The addition of glutamine to the culture medium is necessary due to the instability of this amino acid at 37°C. The ATPase activity of the chaperone Hsp90 α provides energy-dependent correction of many misfolded client proteins, protecting them from ubiquitination and 26S proteasome-promoted degradation [20]. As Hsp90 α levels decrease with EGFR depletion, misfolded glutamine-prone proteins become available for degradation by proteases. Therefore, the dependence of EGFR activation and related processes on the content of glutamine in cells can be formulated as «no glutamine, no EGFR signaling».

New philosophy of cancer chemotherapy. Chemotherapeutic interruption of the flow of MAPK/ERK phosphorylation by allosteric TKIs is a promising tool for reducing the metastatic spread of cancer cells [28]. Small molecular glues and heterobifunctional molecules have also been developed as targeted protein degraders to treat cancer and other diseases. PROTAC targeted protein degradation is particularly attractive for modulating proteins that are difficult to target with TKIs [29]. Other types of molecular glues based on the ability of thalidomide to act as a degrader constitute another important class of drug-like agents for the treatment of diseases [30]. Scientific progress in recent years and clinical trials of PROTAC degraders and thalidomide analogs in clinical phases I and II suggest that targeted protein degradation will become a key therapeutic option in the fight against cancer in the coming decades.

We have developed an alternative targeted protein degradation approach based on 4-allyl-5-[2-(4'-alkoxyphenyl)quinolin-4-yl]-4H-1,2,4-triazole-3-thiol derivatives, which bind EGFR [7]. These small degraders are completely different from the PROTAC and thalidomide degraders and are likely to be advantageous in terms of their action on cancer cells. The polyfunctional heterocyclic compounds target and degrade EGFR, resulting in a cascade of death-promoting events that resemble cancer cell cytotoxic killers rather than cancer cell proliferation cytostatic blockers. We believe that such an action opens a very attractive and effective prospect of cancer treatment.

New compounds first bind to a hydrophobic allosteric pocket located in the immediate vicinity of the ATP binding site (Fig. 5A). Molecular dynamics simulation has revealed that the short chain CH_3CH_2 in new compounds is not bulky enough to fill the hydrophobic allosteric pocket, while the longer chain $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4$ almost completely occupies this site. An important role in the binding of compounds to EGFR seems to be played by their reorientation from Arg803 to Arg841, which is consistent with the participation of Arg841 in the dynamic changes preceding the sulfenylation of Cys797 [7, 31]. This probably leads to the interaction of longer alkyl ether chains of the compounds with Met766 in the $\alpha\text{C}\beta 4$ loop located near the ATP binding site. This rearrangement may accelerate and/or enhance the endocytic degradation of EGFR (Fig. 5B). Induced depletion of EGFR and probably its associated Hsp90 α chaperone leads to sequestration of Bim, which provokes disintegration of the cytoskeleton. Therefore, two different authentic pathways of protein degradation metabolism, endocytic and cytoplasmic degradations, promote cell detachment. This course of logically connected events reflects the functional interplay that precedes the death of cancer cells.

The impact on the degradation of EGFR by new generation of small molecules is a fundamentally different rational way to reduce the activity of tyrosine kinase. Targeting EGFR degradation has an advantage over EGFR inhibition because it promotes a more specific interruption of Bim phosphorylation leading to the death of cancer cells. Unlike cytostatic TKIs against EGFR, allosteric degraders of EGFR affect cell survival rather than growth and induce cancer cell death like cytotoxic molecules. This unexpected biological scenario is reminiscent of the return of «immortal» cancer cells to programmed cell death, anoikis. This means that allosteric inhibitors of EGFR are not «cancer cell killers», but rather molecules that restore the lost ability of cancer cells to die like normal cells after a certain number of generations. Notably, reduction in tumor size by allosteric inhibitors of EGFR has been confirmed *in vivo* in a mouse model of sarcoma [32].

The proposed mechanism of targeted protein degradation indicates that allosteric degraders of EGFR are attractive and promising agents for chemotherapy of human metastatic tumors. Shutting down phosphorylation pathways by potent TKIs in proliferating cancer cells creates selective conditions for the emergence of different mutants through alternative mechanisms, such as H_2O_2 release, in the branched EGFR interactome in the tumor

microenvironment. Conversely, protein degradation due to EGFR depletion results in cancer cell death, leaving fewer cells to proliferate, making it less likely to create conditions for new mutations to occur. Thus, this study opens the door to research aimed at attenuating metastatic progression and reducing drug resistance in malignant tumors associated with aberrant EGFR behavior in cancer cells.

¹Faculty of Pharmacy, Nantes University, France

²Institute of Fine Organic Chemistry after A. Mnjoyan of NAS RA
e-mail: vehary.sakanyan@orange.fr

**Foreign member of NAS RA V. A. Sakanyan,
M. A. Iradyan, N. S. Iradyan**

Development of Targeted EGFR Degradation for Cancer Treatment

Chemotherapeutic interruption of signaling pathways at receptor tyrosine kinases is an important strategy for attenuating cancer progression. We have synthesized a new generation of polyfunctionalized heterocyclic compounds that bind to an allosteric site in the tyrosine kinase domain of the epidermal growth factor receptor (EGFR). The bound compounds induce degradation of the receptor by endocytosis in cancer cells. The Hsp90 α chaperone binds to EGFR and is significantly lost during endocytosis, thereby contributing to the reduction of client proteins. Induced EGFR depletion leads to inactivation of downstream signaling due to sequestration of the Bim sensor protein for cytoskeletal proteins, provoking cell detachment from the extracellular matrix and ultimately cancer cell death. The role of glutamine in maintaining the phosphorylation status of EGFR-mediated signaling pathways can be postulated as «no glutamine, no EGFR signaling». Targeted degradation of EGFR is attractive for aiming to attenuate metastatic progression and to override the drug resistance of malignant tumors.

**ՀՀ ԳԱԱ արտասահմանյան անդամ Վ. Ա. Սաքանյան,
Մ. Ա. Իրադյան, Ն. Ս. Իրադյան**

**Քաղցկեղի բուժման նպատակային EGFR-ի
քայքայման մշակում**

Թիրոզինկինազային ընկալիչների ազդանշանային ուղիների արգելափակումը քաղցկեղի առաջընթացը դանդաղեցնելու հնարավոր ռազմավարություն է: Մենք սինթեզել ենք բազմաֆունկցիոնալ հետերոցիկլիկ միացությունների նոր սերունդ, որոնք կապվում են էպիդերմիսի աճի գործոնի ընկալիչի (EGFR) թիրոզինկինազային տիրույթի ակտիվության տեղամասին: Միացությունները էնդոցիտոզով քաղցկեղի բջիջներում առաջացնում են ընկալիչների դեգրադացիա: EGFR-ի հետ կապված Hsp90 α շապերոնը զգալիորեն կորչում է էնդոցիտոզի ժամանակ՝ դրանով իսկ նպաստելով

սպիտակուցների քայքայմանը: EGFR-ի քայքայումը հանգեցնում է ազդանշանի ապա-ակտիվացման՝ ցիտոկմալքի համար Bim սենսորային սպիտակուցի սեկվեստրացիայի պատճառով, ինչը հանգեցնում է բջիջների բաժանման արտաբջջային մատ-րիցից և քաղցկեղի բջիջների մահվան: Գլոտամինի դերը EGFR-ով միջնորդավորված ազդանշանային ուղիների ֆոսֆորիլացման կարգավիճակի պահպանման գործում կարելի է նկարագրել որպես «ոչ գլոտամին, ոչ ազդանշան EGFR-ի համար»: EGFR-ի նպատակային դեգրադացիան գրավիչ է մետաստատիկ առաջընթացը թուլացնելու և չարորակ ուռուցքներում դեղորայքային դիմադրողականությունը ճնշելու համար:

**Иностранный член НАН РА В. А. Саканян,
М. А. Ирадян, Н. С. Ирадян**

Разработка направленной деградации EGFR для лечения рака

Химиотерапевтическое прерывание сигнальных путей на рецепторах тирозинкиназ является важной стратегией для ослабления прогрессирования рака. Синтезировано новое поколение полифункциональных гетероциклических соединений, которые связываются с аллостерическим сайтом в тирозинкиназном домене рецептора эпидермального фактора роста (EGFR). Связанные соединения вызывают деградацию рецептора путем эндоцитоза в раковых клетках. Шаперон Hsp90α, связываясь с EGFR, значительно теряется во время эндоцитоза, тем самым способствуя деградации белков-клиентов. Индуцированное истощение EGFR приводит к инактивации передачи сигналов из-за секвестрации сенсорного белка Bim для цитоскелета, провоцируя отделение клеток от внеклеточного матрикса и в итоге гибель раковых клеток. Роль глутамина в поддержании статуса фосфорилирования сигнальных путей, опосредованных EGFR, можно постулировать как «нет глутамина, нет передачи сигналов через EGFR». Направленная деградация EGFR может быть применена для ослабления метастатического прогрессирования и подавления лекарственной устойчивости злокачественных опухолей.

References

1. Hanahan D., Weinberg R. A. – Cell. 2000. V. 100. P. 57-70.
2. Schlessinger J. – Cold Spring Harb. Perspect. Biol. 2014. V. 6(3), doi: 10.1101/cshperspect.a008912.
3. Mendelsohn J., Baselga J. – Semin. Oncol. 2006. V. 33. P. 369-385.
4. Cohen P., Cross D., Jänne P. A. – Nat. Rev. Drug Discov. 2022, doi.org/10.1038/s41573-022-00418-2-citation.ris.
5. Dale B., Cheng M., Park K. S. et al. – Nat. Rev. Cancer. 2021. V. 21(10). P. 638-654, doi:10.1038/s41568-021-00365-x.
6. Sakamoto K. M., Kim K. B., Kumagai A. et al. – Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2001. V. 98(15). P. 8554-8559, doi: 10.1073/pnas.141230798.
7. Iradyan M., Iradyan N., Hulin P. et al. – Cancers (Basel). 2019. V. 11(8). P. 1094. doi: 10.3390/cancers11081094.
8. Bae Y. S., Kang S.W., Seo M. S. et al. – J. Biol. Chem. 1997. V. 272. P. 217-221.

9. Paulsen C. E., Truong T. H., Garcia F. J. et al. – Nat. Chem. Biol. 2012. V. 8(1). P. 57-64.
10. Sakanyan V., Hulin P., Alves de Sousa R., Silva V. et al. – Sci. Rep. 2016. V. 6. 21088. doi: 10.1038/srep21088.
11. Sakanyan V. – High Throughput. 2018. V. 7(2). 12. doi: 10.3390/ht7020012. PMID: 29702613; PMCID: PMC6023294.
12. Parzych K. R., Klionsky D. J. – Redox Signal. 2014. V. 20(3). P. 460-473. doi: 10.1089/ars.2013.5371.
13. von Zastrow M., Sorkin A. – Annu. Rev. Biochem. 2021. V. 90. P. 709-737.
14. Tomas A., Futter C. E., Eden E. R. – Trends Cell Biol. 2014. V. 24(1). P. 26-34. doi: 10.1016/j.tcb.2013.11.002.
15. Galdieri G., Malabarba M. G., Di Flore P. P. et al. – Prog. Mol. Subcell. Biol. 2018. V. 57. P. 235-272.
16. Zhou Y., Sakurai H. – J. Proteomics. 2022. V. 255. P. 104503. doi: 10.1016/j.jprot.2022.104503.
17. Herbst R. S., Fukuoka M., Baselga J. – Nat. Rev. Cancer. 2004. V. 4(12). P. 956-965.
18. Kabeya Y., Mizushima N., Ueno T. et al. – EMBO J. 2000. V. 19. P. 5720-5728.
19. Taipale M., Jarosz D. F., Lindquist S. – Nat. Rev. Mol. Cell. Biol. 2010. V. 11. P. 515-528.
20. Miyata Y., Nakamoto H., Neckers L. et al. Current Pharma. 2013. V. 19. P. 347-365.
21. Citri A., Harari D., Shohat G. et al. – J. Biol. Chem. 2006. V. 128(20). P. 14361-14369.
22. Backe S. J., Sager R. A., Woodford M. R. et al. – J. Biol. Chem. 2020. V. 295(32). P. 11099-11117, doi: 10.1074/jbc.REV120.011833.
23. Pick E., Kluger Y., Giltman J. M., Moeder C. et al. – Cancer Res. 2007. V. 67. P. 2932-2937.
24. Vlahakis A., Debnath J. et al. – J. Mol. Biol. 2017. V. 429. P. 515-530.
25. Reginato M. J., Mills K. R., Paulus J. K. et al. – Nat. Cell. Biol. 2003. V. 5(8). P. 733-740.
26. Seth D., Shaw K., Jazayeri J. et al. – Br. J. Cancer. 1999. V. 80. P. 657-669. doi: 10.1038/sj.bjc.6690407.
27. Tong J., Taylor P., Moran M. F et al. – Mol. Cell. Proteom. 2014. V. 13. P. 1644-1658, doi:10.1074/mcp.M114.038596.
28. Maity S., Pai K. S. R., Nayak Y. – Pharmacol. Rep. 2020. V. 72(4). P. 799-813. doi: 10.1007/s43440-020-00131-0.
29. Békés M., Langley D. R., Crews C. M. – Nat. Rev. Drug Discov. 2022. V. 21(3). P. 181-200. doi: 10.1038/s41573-021-00371-6.
30. Chamberlain P. P., Hamann L. G. – Nat. Chem. Biol. 2019. V. 15(10). P. 937-944. doi: 10.1038/s41589-019-0362-y
31. Truong T. H., Ung P. M.-U., Palde P. B. et al. – Cell Chem. Biol. 2016. V. 23. P. 837-848.
32. Iradyan M. A., Iradyan N. S., Hambardzumyan A. A. et al. – Biol. J. Arm. 2018. V. 70. P. 100-107.

Научные предпосылки создания дендропарков в Армении и перспективы их развития

Ключевые слова: дендрарий, деревья и кустарники, ботанический сад, дендроколлекция, экспозиционный участок.

Дендропарки, как правило, закладываются строго по дендрологическому проекту в стиле ландшафтного или регулярного парка с размещением растений по эколого-географическому, систематическому, декоративному и другим признакам [1]. Строительство первых дендропарков в Армении относится к началу XX в. В 1910-е гг. при железнодорожной станции Ахтала на высоте 650-700 м над ур. м. меценатом и нефтепромышленником Микаэлом Арамянцем был основан изящный Ахталинский декоративный парк, самый старый в республике, который существует до настоящего времени. Абсолютный минимум температуры на территории парка в январе -14.6°C , среднегодовое количество осадков около 500 мм (табл. 1). Как показали результаты научной инвентаризации, на территории парка произрастают такие виды инородных древесных растений, как *Cupressus sempervirens* «*Pyramidalis*», *Maclura aurantiaca*, *Cedrus deodara*, *Albizia julibrissin*, *Parrotia persica*, *Gymnocladus dioica*, *Pinus nigra*, *Fraxinus pennsylvanica* и др., возраст которых превышает 100 лет [2].

После установления в Армении советской власти одной из первоочередных задач Народного комиссариата земледелия республики явилось создание ботанического сада в целях интродукции растений как иноземной, так и местной флоры. Первый ботанический сад в Армении, заложенный в 1927 г. на левом берегу р. Раздан (ныне центр г. Еревана), просуществовал всего 5 лет, после чего его территория была передана Ереванскому тресту озеленения в качестве базы для развития цветоводства [3]. Одним из первых научных учреждений Арм. филиала АН СССР, основанного в 1935 г.,

Таблица 1

Общая характеристика дендропарков Армении

Дендропарк	Местонахождение (регион, город)	Занимаемая площадь, га	Год основания	Высота над ур. моря	Принцип создания дендрокolleкций	Природно-климатические условия				
						Метеорологические данные				Климат
						Среднегодовая Температура	Абсолютный максимум	Абсолютный минимум	Среднегодовое количество осадков, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
Ереванского ботанического сада	г. Ереван	16	1935	1200-1250	Эколого-географический, систематический	+11	+41	-27	350-400	Резко континентальный, сухой, зима с неустойчивым снежным покровом
Ванадзорского ботанического сада	Лори, г. Ванадзор	8	1936	1400-1450	Ландшафтно-декоративный	+7,4	+36	-32	620	Умеренный, лесного типа
Севанского ботанического сада	г. Севан	3	1944	1950	Ландшафтно-декоративный, систематический	+4,9	+32	-35	570	Резкоконтинентальный, зима продолжительная, с устойчивым и мощным снежным покровом
Иджеванский	Тавуш, г. Иджеван	10	1962	650	Ландшафтно-декоративный, систематический	+11	+39	-19	650	Сухой субтропический, зима коротковременная, без устойчивого снежного покрова
Степанаванский «Сосняки»	Лори, с. Гюлагарак	35	1933	1550	Ландшафтно-декоративный, систематический	+6,6	+35	-31	680	Умеренный, лесного типа
Бюраканской обсерватории	Арагацотн, с. Бюракан	40	1960	1450	Ландшафтно-декоративный	+8	+34	-30	580	Резко континентальный, зима суровая, с неустойчивым снежным покровом

1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
Бердский «Соран- нер»	Тавуш, г. Берд	62	1962	1000	Ланд- шафтно- декора- тивный	+9,3	+35	-18	500	Умеренный, лесного типа, с неустойчи- вым снеговым покровом
Джермук- ский	Вайоц- дзор, г. Джер- мук	12	1955	2000- 2070	Декора- тивный	+6,5	+33	-32	720	Зима суровая, продол- жительная, с устойчивым снеговым покровом
Ахталин- ский	Лори, с. Ахтала	10	1912	650- 700	Декора- тивный	+11	+36	-14	520	Сухой, зима непродолжи- тельная, без снегового покрова
Баграта- шенский	Тавуш, с. Багра- ташен	5	1960	390	Декора- тивный	+11	+40	-21	330	Сухой субтропичес- кий, без снегового покрова

стал Ереванский ботанический сад, созданный в том же году в сев.-вост. части г. Еревана на площади 102 га на высоте 1200-1250 м над ур. м. В настоящее время площадь Ереванского ботанического сада составляет около 80 га (табл. 1).

Разрешение актуальных теоретических и практических вопросов интродукции и акклиматизации растений требовало создания опорных пунктов – филиалов ботанического сада, а также дендропарков в различных климатических условиях республики, так как массовое испытание одних и тех же интродуцентов в различных природных поясах дало бы возможность более глубокого изучения биологии интродуцентов для установления целесообразности их применения. Исходя из этого в 1936 г. были организованы Кироваканское (ныне Ванадзорское), а в 1944 г. – Севанское отделения Ереванского ботанического сада. С 1950 г. в состав Ереванского ботанического сада вошло также Гюлагаракское отделение (ныне Степанаванский дендропарк «Сосняки»). Ереванский ботанический сад в основном должен был обеспечить нужды городов и других населенных пунктов полупустынной зоны Центральной и Южной Армении: Ванадзорское отделение – северо-восточных относительно влажных лесных районов, а Севанское – бассейна оз. Севан и других высокогорных районов. В Ленинаканском отделении, заложенном в 1944 г. на площади 6 га в центре г. Ленинакана (ныне Гюмри) и просуществовавшем всего 13 лет, были собраны довольно богатая дендрокolleкция – около 220 видов, а также несколько десятков видов и сортов цветочных культур. В 1957 г. оно было передано горсовету [4].

Наряду с существовавшими ботаническими садами в различных районах республики были организованы многочисленные дендрологические

парки: Степанаванский («Сосняки») – в 1933 г., Кироваканский («Ванадзор») – в 1934 г., Иджеванский – в 1962 г. Эти дендропарки долгие годы являлись опорными пунктами НПО «Армлес» и находились под ведомством Госкомитета лесного хозяйства Арм. ССР [5]. В настоящее время они находятся в подчинении Министерства окружающей среды республики. Кроме того, в Армении дендрологами-энтузиастами созданы маленькие, не имеющие научного профиля, но весьма интересные и богатые ценными декоративными видами дендропарки. Сотрудниками Ереванского ботанического сада в 1960-е гг. дендропарк создан в Бюракане, на территории астрофизической обсерватории (табл. 1). Директором совхоза «Зейтун» Ноемберянского района Б. Варданяном в Дебеташене (ныне Баграташен), самом низком пункте республики (390 м над ур. м.), создан дендропарк, где собрана уникальная коллекция термофильных лиственных и хвойных древесных растений. Лесничим Джермукского лесхоза К. Дрепало в 1955 г. создан дендропарк на территории высокогорного (2100 м над ур. м.) курорта Джермук. В те же годы в г. Берд (Тавуш) создан дендропарк «Сораннер» [6-9].

Наиболее богатым дендросоставом отличается дендропарк Ереванского ботанического сада (более 1000 видов и садовых форм из 159 родов и 61 семейства), за ним следуют Ванадзорский и Иджеванский (соответственно по 566), Степанаванский (438) и Севанский (375). В остальных дендропарках состав коллекции не превышает 120-125 видов (табл. 2).

Что касается географического происхождения дендроколлекций, то во многих дендропарках преобладают представители дендрофлор Кавказа, Евросибири, Восточной Азии и Северной Америки (Ереванский, Севанский, Бюраканский, Джермукский), а в тех, где климат сравнительно теплый, типа субтропического, в составе дендроколлекций довольно часто встречаются также представители дендрофлор более теплых регионов Средиземноморья. Анализ таксономического разнообразия дендроколлекций выявил, что во всех дендропарках больше всего представителей хвойных из семейств *Pinaceae* (*Pinus*, *Picea*), *Cupressaceae* (*Juniperus*, *Thija*, *Biota*), а из лиственных – *Rosaceae* (*Sorbus*, *Spiraea*, *Cotoneaster*, *Crataegus*), *Fabaceae* (*Robinia*, *Caragana*), *Caprifoliaceae* (*Lonicera*, *Sambucus*), *Oleaceae* (*Fraxinus*, *Ligustrum*, *Syringa*, *Jasminum*), *Salicaceae* (*Salix*, *Populus*), *Aceraceae* (*Acer*), *Berberidaceae* (*Berberis*, *Mahonia*), *Betulaceae* (*Betula*) и др. В дендропарках со сравнительно влажным и теплым климатом – Ванадзорском, Степанаванском, Иджеванском и Баграташенском из хвойных в дендроколлекции присутствуют также представители семейств *Taxodiaceae* (*Metasequoia*, *Cryptomeria*, *Chamaecyparis*), *Taxaceae* (*Taxus*), *Cupressaceae* (*Cupressus*), *Pinaceae* (*Larix*, *Abies*, *Cedrus*), а в коллекциях дендропарков сухого субтропического климата – представители семейств *Magnoliaceae* (*Magnolia*), *Celastraceae* (*Celastrus*), *Oleaceae* (*Olea*), *Fabaceae* (*Albizzia*) и др. (табл. 3).

Таблица 2

Анализ дендроколлекций дендропарков Армении *

Дендропарк	Число таксонов			Число видов по жизненным формам						Географическое происхождение
	Семейство	Род	Вид, разновидность, садовая форма	Хвойные	Листопадные	Вечнозеленые лиственные	Деревья	Кустарники	Лианы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ереванского ботанического сада	61	159	1063	88	940	35	393	532	138	Кавказ, Евросибирь, Восточная Азия, Северная Америка
Ванадзорского ботанического сада	43	133	566	63	492	11	243	311	12	Северная Америка, Восточная Азия, Средиземноморье
Севанского ботанического сада	39	98	375	42	328	5	218	190	14	Кавказ, Евросибирь, Восточная Азия, Северная Америка
Иджеванский	61	163	566	131	376	59	312	246	8	Северная Америка, Восточная Азия, Средиземноморье
Степанаванский «Сосняки»	28	115	438	41	364	33	226	198	14	Северная Америка, Восточная Азия, Средиземноморье
Ванадзорский «Ванадзор»	25	52	145	32	104	9	49	80	16	Северная Америка, Восточная Азия, Средиземноморье
Бюраканской обсерватории	28	69	120	17	103	-	82	36	2	Кавказ, Евросибирь Восточная Азия, Северная Америка
Бердский «Соранер»	27	63	126	21	103	2	58	65	3	Северная Америка, Восточная Азия, Средиземноморье

*Данные приведены по результатам последних научных инвентаризаций (1990-2000 гг.) дендроколлекций ботанических садов и дендропарков Армении.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Джер-мук-ский	26	68	124	13	111	-	61	59	4	Кавказ, Евросибирь, Восточная Азия, Северная Америка
Ахта-лин-ский	21	39	41	8	29	4	28	8	5	Северная Америка, Восточная Азия, Средиземноморье
Багра-ташен-ский	19	41	74	31	38	5	41	30	3	Северная Америка, Восточная Азия, Средиземноморье
Джер-мук-ский лесо-парк	12	18	28	8	20	-	18	8	2	Кавказ, Евросибирь, Восточная Азия, Северная Америка

Таблица 3

Таксономические особенности дендрокolleкций дендропарков Армении

Дендро-парк	Семейство			Род		
	Число	Наиболее характерные (богатые)		Число	Наиболее характерные (богатые)	
		Хвой-ные	Лиственные		Хвойные	Лиственные
1	2	3	4	5	6	7
Ереван-ского ботани-ческого сада	61	<i>Cupres- saceae, Pinaceae</i>	<i>Fabaceae, Berberidaceae, Caprifoliaceae, Rosaceae, Oleaceae, Salicaceae</i>	159	<i>Biota, Thuja, Pinus, Picea, Juniperus</i>	<i>Acer, Lonicera, Quercus, Clematis, Spiraea, Syringa, Sorbus, Berberis, Salix, Populus, Robinia</i>
Вана-дзорско-го бота-ничес-кого сада	43	<i>Cupres- saceae, Pina- ceae, Таха- ceae, Taxodiac eae</i>	<i>Rosaceae, Caprifoliaceae, Oleaceae, Fagaceae, Aceraceae, Tiliaceae, Hippocastanaceae, Fabaceae, Buxaceae</i>	133	<i>Pinus, Larix, Picea, Abies, Taxus, Metase- quoia, Juniperus, Thuja, Cryptomeria</i>	<i>Acer, Spiraea, Fraxinus, Sorbus, Fagus, Quercus, Ligustrum, Aesculus, Buxus</i>
Севан-ского ботани-ческого сада	39	<i>Cupressa ceae, Pinaceae</i>	<i>Rosaceae, Caprifoliaceae, Salicaceae, Berberidaceae, Betulaceae, Aceraceae, Oleaceae, Fabaceae</i>	98	<i>Juniperus, Pinus, Picea,</i>	<i>Lonicera, Spiraea, Rosa, Berberis, Syringa, Salix, Populus, Crataegus, Fraxinus, Acer, Caragana</i>
Идже-ванский	61	<i>Taxaceae , Pinaceae , Taxodiac eae, Cupressa ceae</i>	<i>Magnoliaceae, Berberidaceae, Rosaceae, Fabaceae, Aceraceae, Celastraceae, Fagaceae, Oleaceae</i>	163	<i>Taxus, Abies, Pinus, Picea, Larix, Cedrus, Cryptomeria, Cupressus, Chamaceyparis , Juniperus</i>	<i>Magnolia, Berbe- ris, Mahonia, Spiraea, Cotoneaster, Pyracantha, Philadelphus, Albizia, Acer, Euonymus, Fagus, Quercus, Fraxinus, Jasminum</i>

1	2	3	4	5	6	7
Степанаванский «Сосняки»	28	<i>Taxaceae, Pinaceae, Taxodiaceae, Cupressaceae</i>	<i>Rosaceae, Fagaceae, Aceraceae, Buxaceae, Hippocastanaceae, Betulaceae, Bignoniaceae</i>	115	<i>Pinus, Picea, Taxus, Thuja, Metasequoia, Juniperus, Larix</i>	<i>Acer, Spiraea, Fraxinus, Sorbus, Buxus, Aesculus, Fagus, Quercus, Betula, Catalpa</i>
Бюраканской обсерватории	28	<i>Pinaceae, Cupressaceae</i>	<i>Fagaceae, Betulaceae, Oleaceae, Aceraceae, Fabaceae, Ulmaceae, Rosaceae</i>	69	<i>Pinus, Picea, Thuja, Biota, Juniperus</i>	<i>Betula, Quercus, Fraxinus, Acer, Robinia, Ulmus, Sorbus</i>
Бердский «Соранер»	27	<i>Pinaceae, Cupressaceae, Taxaceae</i>	<i>Aceraceae, Oleaceae, Fabaceae, Rosaceae, Fagaceae, Celastraceae</i>	63	<i>Pinus, Picea, Larix, Cedrus, Cupressus, Thuja, Juniperus</i>	<i>Quercus, Fagus, Spiraea, Lonicera, Ligustrum, Euonymus, Caragana</i>
Джермукский	26	<i>Pinaceae, Cupressaceae</i>	<i>Betulaceae, Aceraceae, Oleaceae, Rosaceae, Asilicaceae, Ulmaceae</i>	68	<i>Pinus, Juniperus, Picea</i>	<i>Betula, Fraxinus, Padus, Ulmus, Salix, Populus, Lonicera</i>
Ахталинский	21	<i>Pinaceae, Cupressaceae</i>	<i>Simarubaceae, Betulaceae, Moraceae, Buxaceae</i>	39	<i>Juniperus, Pinus, Cupressus, Biota, Thuja, Cedrus</i>	<i>Buxus, Ailanthus, Acer, Ficus, Betula</i>
Баграташенский	19	<i>Taxodiaceae, Pinaceae, Cupressaceae</i>	<i>Magnoliaceae, Oleaceae, Fagaceae, Moraceae, Rosaceae, Celastraceae</i>	41	<i>Metasequoia, Cryptomeria, Pinus, Picea, Biota, Cedrus, Cupressus, Juniperus</i>	<i>Olea, Quercus, Magnolia, Laurocerasus, Acer, Maclura, Fraxinus, Ligustrum</i>

Таким образом, на небольшой территории Армении в первой половине XX в. создано более 10 ботанических садов и дендропарков, расположенных преимущественно в северо-восточных регионах (Лори, Табуш), где лесорастительные условия более или менее благоприятные и лесистость территории несравненно выше (28-30%). А в аридных (южных) регионах с резко континентальным климатом, какими являются Вайоц дзор, Сюник (Зангезур, Мегри), их нет. В этих регионах, где распространены полупустыни, редколесья, а также некоторые группировки ксерофильной растительности, климат резко континентальный [10]. Среднегодовая температура воздуха -10.6°C, годовая сумма осадков – всего до 350 мм; за весь вегетационный период (6 месяцев) выпадает лишь 1/3 часть, а за 4 летних месяца – около 20% от годовой нормы осадков. Закладка дендропарков в Южной Армении крайне необходима и не претендует на создание коллекции преимущественно представителей различных иноземных дендрофлор. Главная цель заключается в улучшении санитарно-гигиенических и микроклиматических условий окружающей среды, в выра-

щивании посадочного материала, адаптированного к засушливым условиям.

Таблица 4

Условия создания дендропарков в аридной зоне Южной Армении

Регион, лесорастительные условия	Целесообразное место для закладки дендропарка	Высота над ур. моря	Занимаемая площадь, га	Принцип создания дендрокolleкции	Соотношение аборигенных и интродуцированных видов, %	Рекомендуемое число таксонов								
						Аборигенных			Интродуцированных			Общее		
						Семейство	Род	Вид	Семейство	Род	Вид, разнообразие	Семейство	Род	Вид, разнообразие
Вайоц дзор, нижнее течение р. Арпа – зона сухих степей	10-12 км до г. Ехегнадзор – между сс. Гнишик и Арпи	1100-1200	8-10	Ландшафтно-декоративный	65/35	28	53	92	7	35	55	38	93	159
Сюник, окр. г. Капан		800-900	10-12	Ландшафтно-декоративный	60/40	30	66	104	8	27	55			

Дендропарки и лесопарки можно создавать на базе уже существующих лесных массивов и искусственных зеленых зон. Важнейшее значение при подборе территории для закладки дендропарков имеют микроклимат местности, роза ветров, почвенные и температурные условия, удаленность от населенного пункта, а также живописность пейзажа, разнообразие рельефа и достопримечательности.

Аридные дендропарки целесообразно организовать в предгорном и нижнегорном поясах (по возможности в удобных ущельях) недалеко от населенных мест в пределах абсолютных высот 500-800 (900) (в Мегри, Зангезуре и Северной Армении) – 1000-1200 (в Вайке, Араратской котловине) м над ур. м. Размеры дендропарков, созданных на базе природных ландшафтов, должны составлять 8-10 (12) га (табл. 4).

Первоочередными задачами при создании аридных дендропарков являются следующие.

- Подбор засухоустойчивых видов, способных существовать в аридных условиях. В этом отношении вполне пригодны основные представители аридных редколесий и шибляка (*Celtis caucasica*, *C. glabrata*, *Pistacia mutica*, *Acer ibericum*, *Amygdalus fenzliana*, *Juniperus polycarpus*, *J. foetidissima* и др., а из кустарников – *Lonicera iberica*, *Rhamnus pallasii*, *Jasminum fruticans*, *Ligustrum*

vulgare и др.). Следовательно, основными компонентами должны быть ксерофильные представители аборигенной дендрофлоры.

- Следует отметить, что в дендрофлоре республики многие ее представители наряду с высокой ксерофильностью отличаются и декоративными свойствами, хотя и большинство из них до сих пор не нашло применения в практике озеленения: *Lonicera caprifolium*, *Jasminum fruticans*, *Rhus coriaria*, редкие представители родов *Sorbus*, *Crataegus*, *Pyrus* и др.
- В составе дендрофлоры много редких и исчезающих видов, эндемиков и реликтов, большинство из которых отличается высокой засухоустойчивостью в аридной зоне республики: *Sambucus tigranii*, *Zelkova carpinifolia*, *Cercis griffithii*, *Colutea komarovii*, *Sorbus graeca*, *Amygdalus nairica*, *Nitraria sdhoberi* и др. Включение в ассортимент этих видов может содействовать их охране и воспроизводству именно в пределах данного региона.
- Обеспечение правильного соотношения листопадных и вечнозеленых видов, в первую очередь хвойных, которыми, как известно, дендрофлора Армении весьма бедна. Из семи видов хвойных (5 видов можжевельника, *Pinus kochiana*, *Taxus baccata*) лишь последний непригоден для использования в засушливых условиях. Остальные, особенно древовидные можжевельники (*Juniperus polycarpus* и *J. foetidissima*), целесообразно использовать как исключительно засухоустойчивые виды, обладающие к тому же высокой фитонцидностью.
- Привлечение, помимо декоративных видов, и диких плодовых.

Густота посадок и схема размещения древесных зависят от почвенных условий, экспозиции и крутизны склонов. Особенно важное значение приобретает соотношение открытых и закрытых пространств.

С целью уменьшения летнего зноя рекомендуется создавать густые посадки из главных и сопутствующих пород и кустарников (60-80% общей территории). В таких случаях на 1 га рекомендуется высаживать 250-300 деревьев и 1.5-2.0 тыс. кустарников.

Необходимо обратить внимание также на создание тенистых аллей с многочисленными перголами, боскетами, гротами и другими архитектурными формами, способствующими уменьшению зноя, увеличению относительной влажности воздуха.

В условиях резко континентального климата при высокой расчлененности рельефа для создания искусственных фитоценозов на эродированных горных склонах, в оврагах и других неудобьях решающее значение приобретает влажность почвы. В этой связи все приемы выращивания декоративных насаждений должны быть направлены на накопление и сбережение почвенной влаги. Обеспечение растений влагой в течение всего вегетативного периода, достижение высокой приживаемости и их нормального роста в аридных условиях возможно лишь при глубоком рыхлении почвы, способствующем улучшению не только режима влаж-

ности почвы на большой глубине, но и ее физико-механических свойств для благоприятного минерального питания растений. Подготовку слабо-каменистых почв на склонах крутизной до 10-12° с целью накопления влаги можно производить глубоким бороздованием (0.5-0.6 м). На средне-каменистых почвах (20-30%) с выходом скал (до 15-20%), на склонах крутизной 15-35° подготовку почв придется производить вручную, с копкой траншей глубиной до 35 см. На сильнокаменистых почвах необходимо удалять камни с последующим их использованием для создания рокариев и гротов, а также при необходимости для террасирования склонов.

Институт ботаники им. А. Тахтаджяна НАН РА
e-mail: zh.vardanyan@gmail.com

Член-корреспондент НАН РА Ж. А. Варданян

**Научные предпосылки создания дендропарков в Армении
и перспективы их развития**

Обсуждаются вопросы создания в Армении дендропарков, их состояние, приводится анализ дендроколлекций. Рассматриваются возможности и принципы закладки новых дендропарков в аридных регионах юго-восточной Армении.

ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Ժ. Հ. Վարդանյան

**Հայաստանում դենդրոպարկերի ստեղծման գիտական
նախադրյալները և դրանց զարգացման հեռանկարները**

Քննարկվում են Հայաստանում դենդրոպարկերի ստեղծման հարցերը, դրանց վիճակը, բերվում է դենդրոհավաքածուների վերլուծությունը: Դիտարկվում են Հարավարևելյան Հայաստանի արիդային տարածաշրջաններում նոր դենդրոպարկերի ստեղծման հնարավորությունները և սկզբունքները:

Corresponding member of NAS RA Zh. H. Vardanyan

**Scientific Prerequisites for the Creation of Arboretums
in Armenia and Prospects for Their Development**

The issues of history and prerequisites for the creation of arboretums in Armenia, their state and analysis of the dendrological collection, as well as the possibilities and principles for creating new arboretums in arid regions in southeastern Armenia are discussed.

Литература

1. Энциклопедия лесного хозяйства: в 2-х томах. Т. 1. М. ВНИИЛМ. 2006. 424 с.
2. Казарян Е. С., Ярошенко Г. Д. – Тр. Бот. Ин-та АН АрмССР. 1948. Вып. 1. С. 17-31.
3. Казарян В. О. – Бюл. Бот. сада АН АрмССР. 1950. № 9. С. 1-50.
4. Вардамян Ж. А. Научные основы интродукции древесных растений в Армении. Ереван. Гитутюн. 2012. 400 с.
5. Аннотированный каталог деревьев и кустарников ботанических садов и дендропарков Армянской ССР. 1985. Бюл. Бот. сада АН АрмССР. № 27. 1985. 164 с.
6. Леонович Э. Л. – Бюл. Бот. сада АН АрмССР. 1951. № 10. С. 17-30.
7. Азарян В. А. – Бюл. Бот. сада АН АрмССР. 1965. № 20. С. 61-72.
8. Арутюнян Л. В., Бозоян А. А. – Биол. журн. Армении. 1968. Т. 20. № 1. С. 72-84.
9. Саядян М. Л. Коллекция растений. Иджеванский субтропический дендрологический парк. Ванадзор. 2010. 204 с.
10. Багдасарян А. Б. Климат Армянской ССР. Ереван. Изд-во АН АрмССР. 1958. 140 с.
11. Вардамян Ж. А. – Бюл. Гл. бот. сада РАН. Вып. 181. 2000. С. 118-122.
12. Вардамян Ж. А. Деревья и кустарники Армении в природе и культуре. Ереван. Изд-во Ин-та бот. НАН РА. 2003. 367 с.

УДК 581.331.2: 582.579.2

DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.3-239

А. М. Айрапетян, А. Г. Мурадян

**Сравнительный палиноморфологический анализ подродов
Limniris (Tausch) Spach и *Scorpiris* Spach рода *Iris* L.
(Iridaceae) флоры Армении**

(Представлено чл.-кор. НАН РА Ж. А. Варданяном 23/VIII 2022)

Ключевые слова: *Iridaceae*, *Iris*, морфология пыльцы.

Введение. Согласно литературным данным [1] виды подрода *Limniris* (Tausch) Spach – корневищные растения с хорошо развитыми стеблями и плосколинейными листьями, в то время как представители подрода *Scorpiris* Spach – луковичные растения с канальчатыми и обычно мечевидными листьями. Подрод *Limniris* в Армении представлен 4 видами – *I. demetrii* Achv. & Mirzoeva, *I. lazica* Albov, *I. musulmanica* Fomin, *I. sibirica* L., из которых последние 2 вида занесены в Красную книгу растений Армении [2]. Виды *I. atropatana* Grossh., *I. caucasica* Hoffm., *I. pseudocaucaucasica* Grossh. входят в подрод *Scorpiris* Spach, из них *I. atropatana* и *I. pseudocaucaucasica* также включены в Красную книгу растений Армении [2]. В Армении *I. demetrii* встречается в Ширакском, Арагацском, Лорийском, Апаранском, Севанском, Гегамском, Ереванском (Гохт, Гехарт), Дарелегисском, Зангезурском флористических районах на высоте 1400-2500 м над ур. м. на сухих каменистых или травянистых склонах. *I. musulmanica* распространен в Ереванском флористическом районе (исключительно в Арагатской долине) на влажных солонцеватых лугах, на засоленных болотах на высоте 800 м над ур. м. Вид *I. sibirica* встречается в Верхне-Ахурянском (с. Ибиш), Лорийском (Лорийская равнина, Степанаван, Клин), Иджеванском (сс. Лермонтово, Маргаовит) флористических районах на высоте 1600-1800 м над ур. м. на избыточно увлажненных или заболоченных местах. Вид *I. atropatana* произрастает в Дарелегисском флористическом районе на сухих каменистых щебнистых и глинистых склонах на высоте 500-1800 м над ур. м. *I. caucasica* встречается в Верхне-Ахурянском, Ширакском, Арагацском, Лорийском, Апаранском, Севанском, Гегамском, Ереванском, Зангезурском, Мегринском флористических

районах на высоте 400-2500 м над ур. м. на сухих глинистых, каменистых склонах, на остепненных лугах. Вид *I. pseudocaucaucasica* произрастает в Ереванском (Урцский хр.), Мегринском (Шванидзор, Гимаранц, Гудемнис, Варданидзор, Айгедзор, Личквас) флористических районах на сухих глинистых, каменистых склонах, в шибляке на высоте 600-600 м над ур. м. [1].

Сведения по пыльце некоторых видов из указанных подродов на уровне светового (СМ: AmScore) и сканирующего электронного (СЭМ: JEOL JSM-7000) микроскопов приводятся в работах ряда исследователей [3-8].

Описание морфологии пыльцы рода *Iris* L. в целом (на уровне СМ) дано в 10 томе «Флоры Армении» [9]. Изучение пыльцы некоторых представителей указанных выше подродов на уровне СМ и СЭМ проводилось также Айрапетян, Аветисян [10], Мурадян [11].

В настоящей работе приводятся результаты исследований морфологии пыльцы видов подродов *Limniris* (Tausch) Spach и *Scorpiris* Spach флоры Армении на уровне СМ и СЭМ. Проведен также сравнительный палиноморфологический анализ представителей указанных двух подродов рода *Iris* флоры Армении с учетом данных, представленных в нашей предыдущей статье по виду *I. lazica* Albov [11].

Материал и методика. Материалом для настоящих исследований послужила пыльца, полученная из гербария Института ботаники НАН РА (ЕРЕ), а также из личных сборов на территории Ереванского ботанического сада и из экспедиционных поездок. Изучение особенностей морфологии пыльцы проводилось с применением СМ и СЭМ.

Для изучения на уровне СМ пыльцевые зерна были обработаны двумя основными методами: методом окрашивания основным фуксином [12] и упрощенным ацетолизным методом [13]. При этом, как и в предыдущих исследованиях представителей рода *Iris*, после обработки ацетолизным методом было замечено, что оболочка пыльцевых зерен частично или полностью разрушается. В связи с этим основные исследования, а также микрофотографирование пыльцы всех изученных образцов на уровне СМ нами проводились преимущественно на материале, окрашенном основным фуксином. А для детального изучения структуры экзинового слоя использовалась пыльца, обработанная ацетолизным методом.

На уровне СМ пыльца исследовалась при увеличении x200, x400 и x1000, измерения проводились на 10 пыльцевых зернах по каждому из изученных образцов. Палиноморфологическая характеристика представителей каждого из двух упомянутых выше подродов рода *Iris* флоры Армении (на уровне СМ) представлена в табл. 1, 2.

Микрофотографии пыльцы на уровне СЭМ были получены в Центре эколого-ноосферных исследований НАН РА (Ереван, Армения) методом вакуумного напыления золотом сухих неацетолизированных пыльцевых зерен.

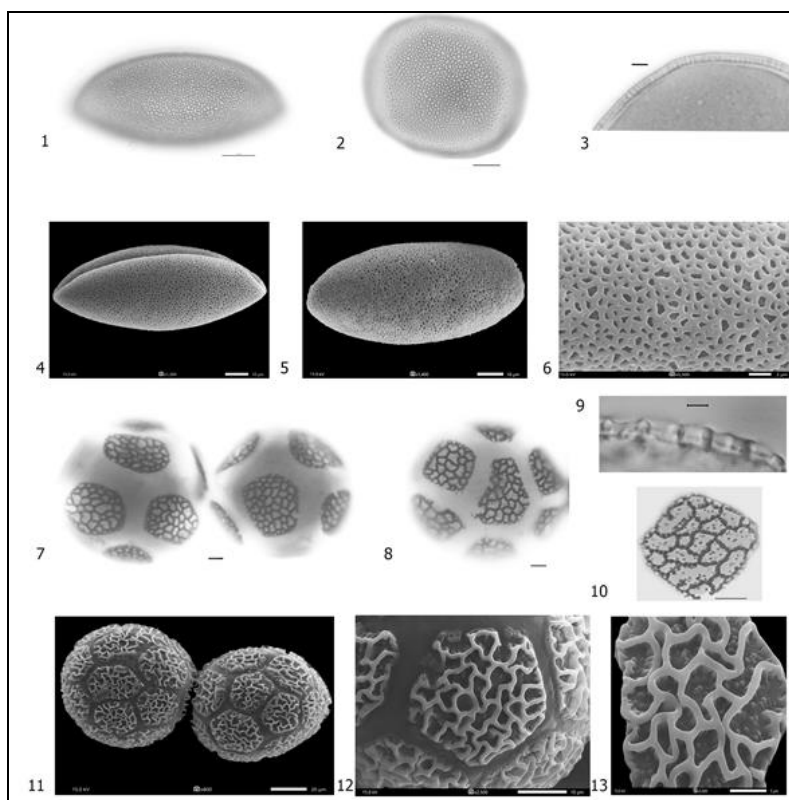
Палинологическая терминология, используемая в наших исследованиях, в основном соответствует терминологии, предложенной Эрдтманом [14], Куприяновой, Алешиной [15], а также Бобровым и др. [4].

Изученные образцы: *I. demetrii* Achv. & Mirzoeva: 01.08.1963 пересажен из Даралагеца, (верхов. ущелья Алаяз) на куртину Л. В. П. в грядку 45, участок Отдела флоры и раст. Армении. 19.06.1968. Leg. Ахвердов (ERE, 148528); Ехегнадзорский р-н, с. Ахавнадзор, южные склоны г. Ульгюр. 2000-2500 м н. у. м. Leg. Е. Gabrielian (ERE, 144324); *I. musulmanica* Fomin: Ереванский бот. сад. 06.06.2019. Leg. А. Мурадян (лич. сб.); Армения, марз Арарат, засоленные болота у города Арарат, по дороге к минеральным бассейнам, 39°49'43"N / 44°43'19"E, 817 м н. у. м. 26.05.2022. Leg. М. Оганесян, А. Элбакян, А. Мурадян, А. Сонян (ERE, 200322); Арм. ССР, Вединский р-н, Арарат х Суренаван, засоленные болота. 29.05.1963. Leg. А. М. Barsegjan (ERE, 94909); *I. sibirica* L.: Арм. ССР, Амасийский р-н, окр. с. Ибиш, заболоченный участок. 3.07.1979. Leg. Файвуш (ERE, 11779); Амасийский р-н, пастбище села Магараджух к юго-вост. от села в 1,5 км на перелог в/ш 1800 м 17.07.1948. Leg. Попов (ERE, 196545); *I. atropatana* Grossh.: Арм. ССР, Азизбековский р-н, сс. Мартирос, Хндзурут, глинистые склоны, трагакантники. 6.05.1981. Leg. А. Кронквист, Э. Габриэлян, М. Оганесян (ERE, 144151); Арм. ССР, Ехегнадзорский р-н, ущ. Аяр в окр. с. Агаракадзор, глинисто-щебнистые склоны. 11.04.1974. Leg. В. Аветисян, В. Манакян, А. Погосян, Л. Мнацаканян, А. Сардарян, О. Никищенко (ERE, 146108); Арм. ССР, Ехегнадзорский р-н, окр. Ехегнадзор. 2.04.1983. Leg. Г. Оганезова (ERE, 126792); *I. caucasica* Hoffm.: Арм. ССР, Араратский р-н, окр. с. Гораван, гребень Урцского хребта, горная степь, 1900-2100 м н. у. м. 3.05.1986. Leg. А. Л. Тахтаджян, Э. Ц. Габриэлян (ERE, 131463); южн. макросклон г. Арагац, 2300 м, остепненный луг у верхней опушки листв. леса. Leg. Ахвердов (ERE, 130043); Sevan, Schordzja. 30.04.1930. Leg. Schelkovnikov (ERE, 17227); *I. pseudocauucasica* Grossh.: Арм. ССР, Мегринский р-н, окр. с. Гудемнис, на глинистых каменистых склонах. 8.04.1976. Leg. Е. Gabrielian (ERE, 139700); Арм. ССР, Мегринский р-н, между сс. Айгедзор и Личкваз, 5.04.1980. Leg. А. Сагателян (ERE, 124035); Арм. ССР, Мегринский р-н, окр. с. Айгедзор, можжев. редколесье, южн. скл. 1200 м н. у. м. 5.04.1976. Leg. Э. Габриэлян, Г. Торосян (ERE, 143335).

Обсуждение. Пыльцевые зерна (п. з.) всех изученных видов подрода *Limniris* дистально-1-бороздные, эллипсоидальные, угловато-широкоэллипсоидальные или яйцевидные, килеватые, киль округлый или округло-угловатый; в очертании с полюса п. з. эллиптические; полярная ось 35,4-65,8 мкм; большой экваториальный диаметр 50,8-83,2 мкм; малый экваториальный диаметр 32,6-65,6 мкм (табл.1, фототабл. I). Борозда у всех видов длинная (фототабл. I, 4), на мембране борозд отмечаются фрагменты сетки. Экзина 1,1-2,5 мкм толщины, столбчатый слой четко выражен, столбики тонкие, регулярно расположенные (фототабл. I, 3).

Скульптура экзины мелкосетчатая, часто в сочетании с перфорациями или ямчатостью (фототабл. I, 2, 6).

П. з. у видов подрода *Scorpiris* безапертурные, сфероидальные, 84,5-131,7 мкм в диаметре. Поверхность п. з. состоит из (5)6-10, 12, 14(16) округлых или округло-угловатых щитков (25,7-62,4 мкм в диаметре), разделенных участками утонченной экзины. Скульптура щитков нерегулярно крупносетчатая; на дне ячеек сетки отмечаются густо расположенные гранулы (фототабл. I, 10, 13).



Фототаблица I. Пыльцевые зерна (п. з.) видов из подродов *Limniris* (Tausch) Spach и *Scorpiris* Spach рода *Iris* L.

***I. demetrii* Achv. & Mirzoeva** (подвид *Limniris* (Tausch) Spach): 1 – п. з. со стороны большого экваториального диаметра, 2 – проксимальный полюс, 3 – экзина, столбчатый слой (1, 2 – фуксин; 3 – ацетолиз) (СМ); 4 – п. з. со стороны большого экваториального диаметра, 5 – проксимальный полюс, 6 – скульптура экзины (СЭМ) (масшт. линейка: 1, 2 – 10 мкм, 3 – 3 мкм, 4, 5 – 10 мкм, 6 – 2 мкм);

***I. atropatana* Grossh.** (подвид *Scorpiris* Spach): 7, 8 – общий вид п. з., 9 – экзина, столбчатый слой, 10 – скульптура щитков (7, 8, 10 – фуксин; 9 – ацетолиз) (СМ); 11 – общий вид п. з., 12, 13 – скульптура щитков (СЭМ) (масшт. линейка: 7, 8, 10-12 – 10 мкм, 9 – 3 мкм, 11 – 20 мкм, 13 – 5 мкм).

Заключение и выводы. По общему виду, размерам, а также типу апертур пыльцы подрод *Limniris* флоры Армении очень близок к под родам *Iris* и *Hermodactiloides* Spach, для представителей которых в целом характерны лодочковидные пыльцевые зерна с дистально-1-бороздным типом апертур. В то же время у видов подрода *Scorpiris* отмечаются сфероидальные безапертурные пыльцевые зерна, поверхность которых состоит из щитков, при этом размеры и формы щитков могут варьировать даже в пределах различных образцов одного и того же вида. С другой стороны, количество щитков, согласно полученным данным, в некоторых случаях может рассматриваться в качестве диагностического признака при разграничении видов в пределах данного подрода. В частности, в отличие от видов *I. atropatana* и *I. caucasica*, характеризующихся наличием в среднем 6-10/7 щитков на поверхности пыльцевого зерна, у пыльцы *I. pseudocaucaucasica* их количество составляет 10, 12, 14/12.

Благодарности. Приносим свою благодарность коллективу Центра эколого-ноосферных исследований НАН РА (Ереван, Армения) за содействие при проведении исследований на сканирующем электронном микроскопе.

Таблица 1

Палиноморфологическая характеристика представителей подрода *Limniris* (Tausch) Spach рода *Iris* L. флоры Армении на уровне СМ

Вид	Размеры п.з.			Толщина экзины, мкм	Скульптура экзины	
	Полярная ось, мкм	Большой экваториальный диаметр, мкм	Малый экваториальный диаметр, мкм			
					СМ	СЭМ
<i>I. demetrii</i>	35,4-48,0/ 43,1	62,9-83,2/ 70,5	41,0-58,4/ 49,2	1,2-2,2/ 1,8	мелкосетчатая	мелкосетчатая
<i>I. lazica</i>	42,1-58,5/ 54,7	52,6-71,2/ 62,8	40,0-57,7/ 50,2	1,3-2,5/ 1,7	- // -	- // -
<i>I. musulmanica</i>	40,7-63,0/ 51,4	62,4-77,1/ 71,8	46,8-56,3/ 51,3	1,5-2,1/ 1,6	- // -	- // -
<i>I. sibirica</i>	41,0-65,8/ 51,3	50,8-73,1/ 64,8	32,6-65,6/ 50,5	1,1-1,7/ 1,3	- // -	- // -

Таблица 2

**Палиноморфологическая характеристика представителей подрода
Scorpiris Spach *Iris* L. флоры Армении на уровне СМ**

Вид	Диаметр п. з., мкм	Размеры щитков, мкм	Коли- чество щитков	Тол- щина экси- ны, мкм	Скульптура эскины на щитках	
					СМ	СЭМ
<i>I. atropatana</i>	90,1- 126,3/ 105,2	30,9- 62,4/ 40,2	6-10/7	2,0- 3,1/2, 5	крупно- сетчатая	крупно- сетчатая
<i>I. caucasica</i>	84,5-111,1/ 94,2	26,0- 47,1/ 36,0	(5)6-10 (12)/7	2,0- 2,9/2, 6	- //-	- // -
<i>I. pseudocau- casica</i>	93,7- 131,7/ 109,3	25,7- 45,8/ 33,7	10, 12, 14(16)/1 2	2,0- 3,4/2, 5	- //-	- // -

Институт ботаники им. А. Л. Тахтаджяна НАН РА
e-mails: alla.hayrapetyan.63@gmail.com, all.muradyan.1991@mail.ru

А. М. Айрапетян, А. Г. Мурадян

**Сравнительный палиноморфологический анализ подродов
Limniris (Tausch) Spach и *Scorpiris* Spach рода *Iris*
L.(Iridaceae) флоры Армении**

С помощью светового и сканирующего электронного микроскопов изучена морфология пыльцы видов из подродов *Limniris* (Tausch) Spach и *Scorpiris* Spach рода *Iris* L. (Iridaceae) флоры Армении. Результаты исследований показали, что основным отличием между указанными двумя подродами являются форма пыльцевых зерен и тип апертур пыльцы. Лодочковидные пыльцевые зерна с дистально-1-бороздным типом апертур выявлены у представителей подрода *Limniris*, в то время как для видов подрода *Scorpiris* характерны сфероидальные безапертурные пыльцевые зерна.

Ա. Մ. Հայրապետյան, Ա. Հ. Մուրադյան

Հայաստանի ֆլորայի *Iris* L. ցեղի (Iridaceae) *Limniris* (Tausch) Spach և *Scorpiris* Spach ենթացեղերի պալինոմորֆոլոգիական համեմատական վերլուծություն

Լուսային և սկանավորող էլեկտրոնային մանրադիտակների օգնությամբ ուսումնասիրվել է Հայաստանի ֆլորայի *Iris* L. ցեղի (Iridaceae) երկու ենթացեղերի՝ *Limniris* (Tausch) Spach և *Scorpiris* Spach տեսակների ծաղկափռչու մորֆոլոգիան: Հետազո-

տությունների արդյունքները ցույց են տվել, որ նշված երկու ենթացեղերի միջև հիմնական տարբերակիչ հատկանիշներն են ծաղկափռու ձևը և ապերտուրային տիպը: *Limniris* ենթացեղի ներկայացուցիչների մոտ դիտվում է դիստալ-1-ակոսավոր ապերտուրային տիպով նավակաձև ծաղկափռու, մինչդեռ *Scorpiris* ենթացեղի տեսակներին բնորոշ է գնդաձև առանց ապերտուրայի ծաղկափռու:

A. M. Hayrapetyan, A. H. Muradyan

Comparative Palynomorphological Analysis of the Subgenera *Limniris* (Tausch) Spach and *Scorpiris* Spach of the Genus *Iris* L. (Iridaceae) of the Flora of Armenia

Pollen morphology of species from the subgenera *Limniris* (Tausch) Spach and *Scorpiris* Spach of the genus *Iris* L. (Iridaceae) of the flora of Armenia was studied using light and scanning electron microscopes. The results revealed that the main differences between these two subgenera are the shape of pollen grains and the type of pollen apertures. Boat-shaped pollen grains with an monosulcate apertures were found in representatives of the subgenus *Limniris*, while species of the subgenus *Scorpiris* are characterized by the spheroidal inaperturate pollen grains.

Литература

1. Габриэлян Э. Ц. Сем. Iridaceae. Род *Iris* L. Флора Армении. А. R. G. Gantner Verlag KG Ruggell/Liechtenstein. 10. 2001. 610 с.
2. Tamanyan K., Fayvush G., Nanagyulyan S., Danielyan T. (eds.). The Red Data Book of plants of the Republic of Armenia. Yerevan. Zangak. 2010. 598 p.
3. Родионенко Г. И. Род ирис – *Iris* L. М. – Л. Издательство АН СССР. 1961. 215 с.
4. Бобров А. Е., Купрянова Л. А., Литвенцева М. Б. и др. Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры Европейской части СССР. Л. Наука. 1983. 207 с.
5. Dönmez E. O., Pinar N. M. – Turk. J. Bot. 2001. V. 25. P. 57-62.
6. Dönmez E. O., Işık S. – Grana. 2008. V. 47. P. 15-38.
7. Mitic B., Halbritter H., Šoštarić R. et al. – Plant Syst. Evol. 2013. V. 299. P. 271-288.
8. Калашник Н. А., Муратова Э. А., Миронова Л. Н. – Изв. Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 1(3). 2014. С. 752-754.
9. Аветисян Е. М., Мехакян А. К., Айрапетян А. М. Описание пыльцевых зерен однодольных. Тахтаджян А.Л. (ред.). Флора Армении, 10. A.R.G. Gantner Verlag KG Ruggell/Liechtenstein, 2001. 610 с.
10. Hayrapetyan A. M., Avetisyan E. M. In: 10th International Palynological Congress (June 24-30, 2000). China. 2000. P. 60.
11. Мурадян А. Г. В: Сб. матер. II Междунар. конф. «Биологическое разнообразие природных и антропогенных ландшафтов: изучение и охрана» (4 июня 2021 г.), Астрахань. 2021. С. 48-51.

12. *Смольянинова Л. А., Голубкова В. Ф.* – ДАН СССР. 1950. Т. 75. № 1. С. 125-126.
13. *Аветисян Е. М.* – Бот. журн. 1950. Т. 35. № 4. С. 385-387.
14. *Эрдтман Г.* Морфология пыльцы и систематика растений. М. ИЛ. 1956. 486 с.
15. *Куприянова Л. А., Алешина Л. А.* Палинологическая терминология покрытосеменных растений. Л. Наука. 1967. 84 с.

Կանոններ հեղինակների համար

1. «Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի Զեկույցներ» հանդեսը լույս է տեսնում տարեկան չորս անգամ, զետեղում է գիտական հետազոտությունների նոր, ոչ մի տեղ չհրապարակված 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. 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. Pictures should be presented by the separate files in bmp or wmf formats.

*The abbreviated name of the journal is
RNAS RA*