

СОДЕРЖАНИЕ

Том 485, номер 1, 2019

МАТЕМАТИКА

- Кривые типа Пеано, числа Лиувилля и микроскопические множества
А. Н. Агаджанов 7
- Логический язык описания полиномиальной вычислимости
С. С. Гончаров, Д. И. Свириденко 11
- Прямо-двойственный ускоренный градиентный метод с одномерным поиском для выпуклых, невыпуклых и негладких задач оптимизации
С. В. Гумино, Ю. Е. Нестеров, П. Е. Двуреченский, А. В. Гасников 15
- 2-факторметод Ньютона решения задачи условной оптимизации с вырожденной системой Куна—Таккера
Ю. Г. Евтушенко, А. А. Третьяков 19
- Сложность действия редутивных групп над алгебраически незамкнутым полем и сильная стабильность действий на флаговых многообразиях
В. С. Жгун, Ф. Кноп 22
-

ФИЗИКА

- Фильтр нижних частот на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле
Б. А. Беляев, С. А. Ходенков, Р. Г. Галеев, В. Ф. Шабанов 27
-

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА, КОСМОЛОГИЯ

- Вариации скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах с известными орбитами
Г. К. Устинова, В. А. Алексеев 33
-

МЕХАНИКА

- Сравнительный анализ режимов взаимодействия двух капель и большой совокупности последних в составе аэрозольного облака
О. В. Высокоморная, А. К. Ребров, П. А. Стрижак, Н. Е. Шлегель 38
-

ХИМИЯ

- Синтез и свойства новых полигетероариленов на основе 2,3,5,6-тетрааминопиридина
И. И. Пономарев, Д. Ю. Разоренов, Ив. И. Пономарев, Ю. А. Волкова, К. М. Скупов, А. А. Лысова, А. Б. Ярославцев 44
-

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Костные цементы на основе магнийзамещённых сульфатов кальция
В. В. Смирнов, Д. Р. Хайрутдинова, С. В. Смирнов, О. С. Антонова, М. А. Гольдберг, С. М. Баринев 48

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Управление морфологией полимерного фотоактивного слоя
в фотовольтаических элементах: мезоскопическое моделирование

П. В. Комаров, П. О. Бабуркин, В. А. Иванов, Шоу-Ан Чен, А. Р. Хохлов

53

ГЕОЛОГИЯ

Изотопный Sr–Nd–Pb–Hf-состав позднепалеозойских гранитоидов
Центральной Чукотки

М. В. Луцицкая, Б. В. Беляцкий, Е. А. Белоусова, Л. М. Натанов

58

ГЕОХИМИЯ

Статистическое вычленение парагенезисов микроэлементов
из ассоциаций в ископаемых углях

Л. А. Адмакин, С. Г. Парада

63

Эпитаксиальный рост, морфология и температурная устойчивость
кристаллов кварцеподобного диоксида германия

*В. С. Балицкий, Д. В. Балицкий, Д. Ю. Пуцаровский,
Л. В. Балицкая, Т. В. Сеткова, Т. Н. Докина*

67

Изотопный состав Nd, Pb и Sr современных донных осадков Баренцева моря

*А. В. Маслов, А. Б. Кузнецов, Н. В. Политова,
Н. В. Козина, А. Н. Новигатский, В. П. Шевченко*

71

ГЕОФИЗИКА

Связь частоты молний со статистическими характеристиками
конвективной активности в атмосфере

А. В. Елисеев, А. Н. Плосков, А. В. Чернокульский, И. И. Мохов

76

ГЕОГРАФИЯ

Почвенные параметры количественной оценки климатических изменений
в позднем голоцене на юге Восточно-Европейской равнины

А. О. Алексеев, П. И. Калинин, Т. В. Алексеева, Г. В. Митенко

83

Содержание и эмиссия метана в доминантных ландшафтах
типичной тундры Западного Ямала

А. А. Васильев, В. П. Мельников, П. Б. Семенов, Г. Е. Облогов, И. Д. Стрелецкая

88

Техногенная радиоактивность вод Центрального Полярного бассейна
и смежных акваторий Арктики

Г. Г. Матишов, Н. Е. Касаткина, И. С. Усягина

93

ОКЕАНОЛОГИЯ

Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море
по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями
хлорофилла *a*

С. В. Востоков, Л. И. Лобковский, А. С. Востокова, Д. М. Соловьев

99

БИОХИМИЯ, БИОФИЗИКА, МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

Архитектура промоторов генов “домашнего хозяйства” в междисках
политенных хромосом *Drosophila melanogaster*

Т. Ю. Зыкова, В. Г. Левицкий, И. Ф. Жимулёв 104

Оптимизация гетерологичной экспрессии эктодомена
рецепторной тирозинкиназы IRR

А. А. Можжев, А. Н. Орса, И. Е. Деев, В. И. Швец, А. Г. Петренко 110

ФИЗИОЛОГИЯ

Механизмы регуляции кровотока в коже при стимуляции
спинного мозга у человека

Г. И. Лобов, Ю. П. Герасименко, Т. Р. Мошонкина 114

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Содержание и баланс эндогенных brassinosterоидов у микроклонов
картофеля определяется органоспецифичностью и скороспелостью сорта

*М. В. Ефимова, Р. П. Литвиновская, Ю. В. Медведева,
О. К. Мурган, А. Л. Савчук, Вл. В. Кузнецов, В. А. Хрипач* 117

Изменение пропорций тела в процессе роста у гидротермальной
вестиментиферы *Oasisia alvinae* Jones 1985 (Annelida, Siboglinidae)

Н. П. Карасева, Н. Н. Римская-Корсакова, М. М. Ганцевич, В. В. Малахов 122

Правила для авторов 126

CONTENTS

Volume 485, Number 1, 2019

English language translation of the mathematics, physics, chemistry, biological, and earth sciences sections of the journal are available from Pleiades Publishing. Ltd. Distributed worldwide by Springer.

MATHEMATICS

- Peano-Type Curves, Liouville Numbers, and Microscopic Sets
A. N. Agadzhanov 7
- Logical Language of Description of Polynomial Computing
S. S. Goncharov, D. I. Sviridenko 11
- Primal-Dual Accelerated Gradient Descent with Line Search for Convex and Nonconvex Optimization Problems
S. V. Guminov, Yu. E. Nesterov, P. E. Dvurechensky, A. V. Gasnikov 15
- 2-factor Newton Method for Solving the Constrained Optimization Problem with the Singular Kuhn–Tucker System
Yu. G. Evtushenko, A. A. Tret'yakov 19
- On Complexity of Reductive Group Actions over Algebraically Non-Closed Field and Strong Stability of the Actions on Flag Varieties
V. S. Zhgoon, F. Knop 22
-

PHYSICS

- A Lowpass Filter Based on a 2D Microstrip Electromagnetic Crystal
B. A. Belyaev, S. A. Khodenkov, R. G. Galeev, V. F. Shabanov 27
-

ASTRONOMY, ASTROPHYSICS, COSMOLOGY

- Variations of Cosmogenic Radionuclide Production Rates in Chondrites of Known Orbits
G. K. Ustinova, V. A. Alexeev 33
-

MECHANICS

- A Comparative Analysis of the Interaction Regimes of Two Drops and Their Large Population in an Aerosol Cloud
O. V. Vysokomornaya, A. K. Rebrov, P. A. Strizhak, N. E. Shlegel 38
-

CHEMISTRY

- Synthesis and Properties of New 2,3,5,6-Tetraaminopyridine Based Polyheteroarylenes
I. I. Ponomarev, D. Yu. Razorenov, Iv. I. Ponomarev, Yu. A. Volkova, K. M. Skupov, A. A. Lysova, A. B. Yaroslavtsev 44
-

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Bone Cements Based on Magnesium-Substituted Calcium Sulfates
V. V. Smirnov, D. R. Khayrutdinova, S. V. Smirnov, O. S. Antonova, M. A. Goldberg, S. M. Barinov 48

PHYSICAL CHEMISTRY

Controlling Morphology of Polymer Photoactive Layer in Photovoltaic Elements:
Mesoscopic Simulation

P. V. Komarov, P. O. Baburkin, V. A. Ivanov, Show-An Chen, A. R. Khokhlov 53

GEOLOGY

Sr–Nd–Pb–Hf Isotopic Composition of Late Paleozoic Granitoids
of Central Chukotka

M. V. Luchitskaya, B. V. Belyatsky, E. A. Belousova, L. M. Natapov 58

GEOCHEMISTRY

The Statistical Selection of the Paragenesis Microelements from
of the Associations in Fossil Coals

L. A. Admakin, S. G. Parada 63

Epitaxial Growth, Morphology and Temperature Stability
of Quartzlike Dioxide Germanium Crystals

*V. S. Balitsky, D. V. Balitsky, D. Yu. Pushcharovsky,
L. V. Balitskaya, T. V. Setkova, T. N. Dokina* 67

Isotopic Composition of Nd, Pb, and Sr in Modern Bottom Sediments
of the Barents Sea

*A. V. Maslov, A. B. Kuznetsov, N. V. Politova,
N. V. Kozina, A. N. Novigatsky, V. P. Shevchenko* 71

GEOFYSICS

Relationship of Lightning Flashes Frequency with Statistical Characteristics
of Convective Activity in the Atmosphere

A. V. Eliseev, A. N. Ploskov, A. V. Chernokulsky, I. I. Mokhov 76

GEOGRAPHY

Soil Parameters for Quantitative Estimation of Late Holocene Climate
Changes in the Southern East European Plain

A. O. Alekseev, P. I. Kalinin, T. V. Alekseeva, G. V. Mitenko 83

Methane Concentration and Emission in Dominant Landscapes
of Typical Tundra of Western Yamal

A. A. Vasiliev, V. P. Melnikov, P. B. Semenov, G. E. Oblogov, I. D. Streletskaya 88

Technogenic Radioactivity of Waters in the Central Arctic Basin
and Adjacent Water Area

G. G. Matishov, N. E. Kasatkina, I. S. Usyagina 93

OCEANOLOGY

Estimation of Seasonal and Inter-Annual Variations of Phytoplankton
in the Black Sea on the Base of Remote Sensed Data Procession
and Chlorophyll *a* *in situ* Measurements

S. V. Vostokov, L. I. Lobkovskiy, A. S. Vostokova, D. M. Solov'ev 99

BIOCHEMISTRY, BIOPHYSICS, MOLECULAR BIOLOGY

Architecture of Promoters of House-Keeping Genes in Polytene
Chromosome Interbands of *Drosophila melanogaster*

T. Yu. Zykova, V. G. Levitsky, I. F. Zhimulev

104

Optimization of Heterological Expression of Insulin
Receptor-Related Receptor Ectodomain

A. A. Mozhaev, A. N. Orsa, I. E. Deyev, V. I. Shvets, A. G. Petrenko

110

PHYSIOLOGY

Mechanisms of Blood Flow Regulation of in the Skin During Stimulation
of the Spinal Cord in Humans

G. I. Lobov, Yu. P. Gerasimenko, T. R. Moshonkina

114

GENERAL BIOLOGY

Content and Balance of Endogenous Brassinosteroids in Potato Microclones
is Determined by the Organ Specificity and Term of Ripening Variety

*M. V. Efimova, R. P. Litvinovskaya, Yu. V. Medvedeva,
O. K. Murgan, A. L. Sauchuk, Vl. V. Kuznetsov, V. A. Khripach*

117

Changing of Body Proportion During Growth in Hydrothermal Vestimentiferan
Oasisia alvinae Jones 1985 (Annelida, Siboglinidae)

N. P. Karaseva, N. N. Rimskaya-Korsakova, M. M. Gantsevich, V. V. Malakhov

122

Author Standards

126

УДК 517.31+511.4

КРИВЫЕ ТИПА ПЕАНО, ЧИСЛА ЛИУВИЛЛЯ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МНОЖЕСТВА

А. Н. Агаджанов

Представлено академиком РАН С.Н. Васильевым 19.09.2018 г.

Поступило 03.10.2018 г.

В сообщении с позиции теории чисел рассматриваются кривые типа Пеано в многомерном евклидовом пространстве. В отличие от кривых, построенных Д. Гильбертом, А. Лебегом, В. Серпинским и др., в настоящей работе представлены результаты, показывающие, что каждая такая кривая является непрерывным образом универсальных (общих для всех кривых) нигде не плотных совершенных множеств из отрезка $[0, 1]$ с нулевой s -мерной мерой Хаусдорфа, состоящих исключительно из чисел Лиувилля. Приводится пример задачи, в которой пара непрерывных функций, управляющих поведением колебательной системы, порождает на плоскости кривую типа Пеано.

Ключевые слова: кривые типа Пеано, совершенные множества, числа Лиувилля, микроскопические множества, уравнение Клейна—Гордона.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-565248517-10>

Под кривыми типа Пеано в \mathbb{R}^n ($n \geq 2$) будем понимать континуумы, т.е. непустые связные компакты, которые имеют внутренние точки и представляются при любом $\varepsilon > 0$ в виде суммы конечного числа подконтинуумов диаметра меньше ε [1].

Эти кривые названы в честь итальянского математика Джузеппе Пеано, построившего в 1890 г. первый пример непрерывного отображения отрезка $[0, 1]$ на квадрат $[0, 1]^2$. В дальнейшем аналогичные примеры были построены Гильбертом, Лебегом, Серпинским и др. Обширная библиография, посвящённая кривым типа Пеано, приведена в [2, 3].

Пусть $0 \leq t \leq 1$. Общий принцип построения кривых типа Пеано основан на выборе таких функций $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t) \in C_{[0,1]}$, что образ отрезка $[0, 1]$ при непрерывном отображении

$$t \rightarrow (\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t)) \in \mathbb{R}^n$$

оказывается локально связным континуумом в \mathbb{R}^n , имеющим внутренние точки. Как известно [1], из локальной связности континуумов следует их представимость в виде суммы конечного числа подконтинуумов диаметра меньше ε .

Функции $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t)$ называют координатными функциями, порождающими в \mathbb{R}^n кривые типа Пеано.

В [4, 5] показано, что многомерный единичный куб может быть получен как непрерывный образ множеств, имеющих нулевую s -мерную меру Хаусдорфа на отрезке $[0, 1]$.

В настоящей работе получены результаты, из которых следует, что кривая типа Пеано в \mathbb{R}^n является непрерывным образом некоторых совершенных множеств из $[0, 1]$, имеющих однородную числовую природу, а именно состоящих из различных классов, принадлежащих множеству чисел Лиувилля. В сообщении описаны три таких множества. Отметим, что каждое из них имеет нулевую s -мерную меру Хаусдорфа и, следовательно, относится к “малым” множествам в смысле теории категорий Бэра [6].

Центральное место в работе занимает

Теорема 1. *Произвольная кривая типа Пеано в \mathbb{R}^n является непрерывным образом универсального (общего для всех кривых) нигде не плотно совершенного множества, представляющего микроскопическое множество.*

В смысле теории s -мерной меры Хаусдорфа микроскопические множества [7], имея мощность континуума, являются значительно “меньшими”, чем множество чисел Лиувилля.

1. НИГДЕ НЕ ПЛОТНЫЕ СОВЕРШЕННЫЕ МНОЖЕСТВА НА $[0, 1]$ И ЧИСЛА ЛИУВИЛЛЯ

Приведём необходимые определения [8, 9].

Определение 1. Действительное число $\xi \in (0, 1)$ называется числом Лиувилля, если оно

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской Академии наук, Москва
E-mail: ashot_ran@mail.ru*

иррационально и для каждого натурального k существуют целые m и n , такие что

$$\left| \xi - \frac{m}{n} \right| < \frac{1}{n^k} \quad \text{и} \quad n > 1.$$

Известно, что любое число Лиувилля является трансцендентным.

Определение 2. Действительное число $\xi \in (0, 1)$ называется m -ультрачислом Лиувилля, если существует бесконечное множество алгебраических чисел (α_n) порядка m , таких что

$$0 < |\xi - \alpha_n| < (\exp^{[3]}(H(\alpha_n)))^{-n}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Здесь $\exp^{[3]}(x) = \exp(\exp(\exp(x)))$, $H(\alpha)$ — высота алгебраического числа α [10].

Определение 3. Действительное число $\xi \in (0, 1)$ называется ультрачислом Лиувилля, если для каждого натурального k существует бесконечно много рациональных чисел $\frac{m}{n}$ ($n > 1$), таких что

$$0 < \left| \xi - \frac{m}{n} \right| < \frac{1}{\exp^{[k]}(n)}.$$

Отметим, что множества чисел Лиувилля, m -ультрачисел Лиувилля и ультрачисел Лиувилля являются базисными на $(0, 1)$, иначе говоря, каждое действительное число из $(0, 1)$ может быть представлено в виде суммы элементов из этих множеств [8, 9]. Подчеркнём, что эти множества имеют на $(0, 1)$ мощность континуума, являются всюду плотными и их s -мерная мера Хаусдорфа равна нулю.

Напомним, что некоторое множество $E \in (0, 1)$ имеет нулевую s -мерную меру Хаусдорфа, если для любого $\varepsilon > 0$ существует такая последовательность интервалов I_n , что $E \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} |I_n|^s < \varepsilon$ и $|I_n| < \varepsilon$ при всех n .

Приведём ряд утверждений, имеющих принципиальное значение в теории кривых типа Пеано.

Утверждение 1. Произвольное множество из $(0, 1)$ с нулевой s -мерной мерой Хаусдорфа содержится в некотором G_δ -нуль-множестве.

Утверждение 2. Пусть L — множество чисел Лиувилля из $(0, 1)$. Существует нигде не плотное совершенное множество U_0 , состоящее исключительно из чисел Лиувилля.

Утверждение 3. Пусть L_m — множество m -ультрачисел из $(0, 1)$. Существует нигде не плотное совершенное множество $U'_m \subset L_m$.

Утверждение 4. Пусть L_u — множество ультрачисел из $(0, 1)$. Существует нигде не плотное совершенное множество $L'_u \subset L_u$.

Имеет место следующая

Теорема 2. Отрезок $[0, 1]$ является непрерывным образом совершенных множеств U_0, U'_m, L'_u , причём непрерывные отображения осуществляются сужениями на эти множества соответствующих возрастающих сингулярных по Лебегу функций.

Иначе говоря, отрезок $[0, 1]$ в топологическом смысле можно считать одномерной кривой типа Пеано.

Справедлива следующая

Теорема 3. Произвольная кривая типа Пеано в \mathbb{R}^n является непрерывным образом каждого из нигде не плотных совершенных множеств U_0, U'_m, L'_u , причём координатные функции $\varphi_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), порождающие эту кривую, представляются в виде $\varphi_i(g_j(\tau))$.

Здесь $j = 1, 2, 3$, $g_j(\tau)$ — сужения возрастающих сингулярных по Лебегу функций на множества U_0, U'_m, L'_u соответственно.

Утверждение 5. Каждая из сингулярных функций $g_j(t)$ является поточечным пределом последовательности сингулярных функций, не имеющих интервалов монотонности.

Дополнительную информацию о сингулярных функциях можно найти в [11, 12].

Кривые типа Пеано оказываются также непрерывными образами микроскопических множеств из отрезка $[0, 1]$. Свойства микроскопических множеств описаны в статье [7].

Определение 4. Множество $E \subset [0, 1]$ называется микроскопическим, если для произвольного $\varepsilon > 0$ существует последовательность интервалов $\{I_n\}$ таких, что $E \subset \bigcup_{n \geq 1} I_n$ и $\lambda(I_n) \leq \varepsilon^n$ при каждом n ($\lambda(I_n)$ — мера Лебега интервала I_n).

Среди микроскопических множеств имеются совершенные множества, не обладающие условием числовой однородности. Иначе говоря, среди их элементов имеются числа, отличные от чисел Лиувилля.

Относительно роли микроскопических множеств в теории кривых типа Пеано следует отметить теорему 1, приведённую выше.

2. ПРИМЕР КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ПРИ УПРАВЛЕНИИ КОТОРОЙ ВОЗНИКАЕТ КРИВАЯ ТИПА ПЕАНО НА ПЛОСКОСТИ

В последние десятилетия активно изучаются задачи граничного управления колебательными системами. Обширную библиографию по этим вопросам можно найти, например, в [13].

Рассмотрим колебательные системы, динамика которых описывается функциями $Q(x, t)$ ($0 \leq x \leq 1, t \geq 0$), имеющими интегральные представления Клейна—Гордона [14]:

$$Q(x, t) = \sum_{i=1}^5 I_i(x, t), \tag{1}$$

где

$$I_1(x, t) = \iint_{00}^{t l} \Phi(\xi, \tau) \cdot L(x, \xi, t - \tau) d\xi d\tau, \tag{2}$$

$$I_2(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^l s(\xi) \cdot f_0(\xi) \cdot L(x, \xi, t) d\xi, \tag{3}$$

$$I_3(x, t) = \int_0^l s(\xi) \cdot f_1(\xi) \cdot L(x, \xi, t) d\xi, \tag{4}$$

$$I_4(x, t) = p(0) \int_0^t \varphi_1(\tau) \cdot \Lambda_1(x, t - \tau) d\tau, \tag{5}$$

$$I_5(x, t) = p(l) \int_0^t \varphi_2(\tau) \cdot \Lambda_2(x, t - \tau) d\tau, \tag{6}$$

$$L(x, \xi, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_n(x) \cdot u_n(\xi) \cdot \sin(t \cdot \sqrt{\lambda_n})}{\|u_n\|^2 \cdot \sqrt{\lambda_n}}, \tag{7}$$

$$\|u_n\|^2 = \int_0^l s(x) \cdot u_n^2(x) dx,$$

$$\Lambda_1(x, t) = \left. \frac{\partial}{\partial \xi} L(x, \xi, t) \right|_{\xi=0}, \tag{8}$$

$$\Lambda_2(x, t) = - \left. \frac{\partial}{\partial \xi} L(x, \xi, t) \right|_{\xi=l}.$$

В (7) λ_n и $u_n(x)$ представляют собственные числа и собственные функции задачи Штурма—Лиувилля для линейного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка

$$(p(x)u'_x)'_x + (\lambda(s(x) - q(x)))u = 0, \tag{9}$$

$$u(0) = 0, \quad u(l) = 0. \tag{10}$$

Предполагаются выполненными условия

$$Q|_{t=0} = f_0(x), \quad \left. \frac{\partial Q}{\partial t} \right|_{t=0} = f_1(x), \tag{11}$$

$$Q|_{x=0} = u(t), \quad Q|_{x=l} = v(t). \tag{12}$$

Поведением колебательной системы (1) можно управлять выбором функций $u(t)$ и $v(t)$.

Если функции $s(x), p(x), p'_x, q(x), f_0(x), f_1(t), \varphi_1(t), \varphi_2(t), \Phi_1(x, t)$ обладают необходимой гладкостью, причём $s(x) > 0, p(x) > 0$ при $0 \leq x \leq l$, то функции

$Q(x, t)$ удовлетворяют дифференциальному уравнению типа Клейна—Гордона

$$s(x) \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(p(x) \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \right) - q(x) \cdot Q + \Phi(x, t). \tag{13}$$

Частными случаями уравнения (13) являются волновое и телеграфные уравнения [13].

Выбор модели поведения колебательной системы в виде (1) существенно снижает требования к гладкости функций, входящих в правые части представлений (2)–(12).

Предположим, что для функции $Q(x, t)$ поточечно выполняется условие $Q(x, t) = \lim_{m \rightarrow \infty} Q_m(x, t)$, где $Q_m(x, t)$ из (1), а условия (12) имеют вид

$$Q_m|_{x=0} = u_m(t), \quad Q_m|_{x=l} = v_m(t). \tag{14}$$

В предположении существования непрерывных поточечных пределов $u(t) = \lim_{m \rightarrow \infty} u_m(t)$ и $v(t) = \lim_{m \rightarrow \infty} v_m(t)$, можно сделать вывод о том, что пара функций $(u(t), v(t))$ управляет поведением системы, когда её динамика описывается $Q(x, t)$.

В частности, если

$$u_m(t) = \sum_{k=1}^m a_k \cdot \cos(n_k \cdot t), \quad v_m(t) = \sum_{k=1}^m a_k \cdot \sin(n_k \cdot t)$$

являются лакунарными тригонометрическими полиномами при $m = 1, 2, \dots$ (n_k — натуральные числа, причём $\frac{n_{k+1}}{n_k} \geq q > 1, \sum_{k=1}^{\infty} |a_k| < +\infty$), то пара управляющих функций $(u(t), v(t))$ имеет вид

$$\left(\sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(n_k \cdot t), \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \sin(n_k \cdot t) \right).$$

Например, при $a_k = \frac{1}{k^p}$ ($p > 1$), $n_k = k!$, из теоремы Салема—Зигмунда [15] следует, что функции $(u(t), v(t))$ порождают на плоскости кривую типа Пеано.

Самостоятельный интерес представляют следующие утверждения.

Утверждение 6. Для функции $u(t)$ множества $u(L), u(L_m), u(L_u)$ имеют вторую категорию по Бэру на множестве $u([0, 1])$.

Аналогичное утверждение выполняется для функции $v(t)$.

Утверждение 7. Для каждой функции $u(t), v(t)$ существуют такие множества A_1, A_2 первой категории по Бэру на $[0, 1]$, что множества $u(A_1)$ и $v(A_2)$ являются множествами второй категории.

Следствие 1. Функции $u(t)$, $v(t)$ не обладают (N) -условием Лузина на $[0, 1]$ в смысле теории категорий.

Утверждение 8. На отрезке $[0, 1]$ существует множество второй категории, состоящее исключительно из чисел Лиувилля $L^* \subset L$, такое что функция $u(t)$ является взаимно однозначной на этом множестве.

Аналогичное утверждение справедливо для функции $v(t)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаусдорф Ф. Теория множеств. М., 2010.
2. Sagan H. Space-Filling Curves. B.: Springer, 1994.
3. Bader M. Space-Filling Curves. B.: Springer, 2010.
4. Liu W. // Chinese J. Math. 1995. V. 23. P. 173–178.
5. Ying-Fen Lin, Ngai-Ching Wong // Comput. & Math. with Appl. 2003. V. 45. P. 1871–1881.
6. Окстоби Дж. Мера и категория. М., 2008.
7. Karasinska A., Wagner-Bojakowska E. // Topology Appl. 2012. V. 159. P. 1894–1898.
8. Marques D., Moreira C.G. // Bull. Austral. Math. Soc. 2015. V. 15. P. 29–33.
9. Marques D., Ramirez J. // Proc. Jap. Acad. Ser. A Math. Sci. 2015. V. 91. P. 25–28.
10. Фельдман Н.И., Шидловский А.Б. // УМН. 1967. Т. 22. В. 3 (135). С. 3–81.
11. Garg K.M. // Rev. Roum. Math. Pureset Appl. 1969. V. 14. P. 1441–1452.
12. Агаджанов А.Н. // ДАН. 2014. Т. 454. № 3. С. 503–506.
13. Знаменская Л.Н. Управление упругими колебаниями. М.: Физматлит, 2004.
14. Полянин А.Д. Линейные уравнения математической физики. М.: Физматлит, 2001.
15. Salem R., Zygmund A. // Duke Math. J. 1945. V. 12. P. 569–578.

PEANO-TYPE CURVES, LIOUVILLE NUMBERS, AND MICROSCOPIC SETS

A. N. Agadzhanov

Presented by Academician of the RAS S.N. Vasilyev September 19, 2018

Received October 3, 2018

Peano-type curves in multidimensional Euclidean space are considered in terms of number theory. In contrast to curves constructed by D. Hilbert, H. Lebesgue, V. Sierpinski, and others, this paper presents results showing that each such curve is a continuous image of universal (shared by all curves) nowhere dense perfect subsets of the interval $[0, 1]$ with a zero s -dimensional Hausdorff measure that consist of only Liouville numbers. An example of a problem in which a pair of continuous functions controlling the behavior of an oscillating system generates a Peano-type curve in the plane is given.

Keywords: Peano-type curves, perfect sets, Liouville numbers, microscopic sets, Klein–Gordon equation.

УДК 510.2; 510.3; 510.6; 51-8; 004.8

ЛОГИЧЕСКИЙ ЯЗЫК ОПИСАНИЯ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИМОСТИ

Академик РАН С. С. Гончаров*, Д. И. Свириденко**

Поступило 16.10.2018 г.

Построено расширение понятия терма и соответственно формулы за счёт новых конструкций. Построены расширения языка, сохраняющие выразительность на Σ -формулах, а на уровне Δ_0 -формул и термов, обеспечивающих полиномиальность алгоритмов вычислений значений терма и истинности Δ_0 -формулы.

Ключевые слова: логика, ограниченные кванторы, наследственно конечные списки, вычислимая модель, терм, условные термы, рекурсивные термы, формула, Σ -формула, Δ_0 -формула, полиномиальные алгоритмы, полиномиальная модель, семантическое программирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485111-14>

Исследования по построению языка семантического программирования на основе дескриптивных конструкций для вычислимых функций и отношений были начаты в работах [1–5], где предложена конструкция построения языка программирования логического типа. Началу этих исследований послужили работы Ю.Л. Ершова [6–8], посвящённые построению обобщённой теории вычислимости на основе теории допустимых множеств Барвайса [9] над расширением исходной модели данных надстройкой из наследственно конечных множеств. При рассмотрении вопросов применения данного подхода к построению систем программирования была построена теория вычислимости через Σ -определимость в надстройке из наследственно конечных списков [2]. При исследовании вопросов полиномиальной сложности будем использовать методы и понятия из [10, 11].

В работе [12] было доказано, что проверка истинности для каждой Δ_0 -формулы, а также вычисление значений терма на супермодели наследственно конечных списков над моделью полиномиальной сложности P-, PSPACE-сложности также будет P-, PSPACE-полиномиальной. В этой связи возникла идея построения логического языка, в котором это свойство сохранялось бы, но Δ_0 -термы, построенные с использованием Δ_0 -формул, определяли бы все полиномиально вычислимые функции, сохраняя при этом декларативную ясность их определений. В данной работе рассматриваются вопросы определимости на основе Δ_0 -формул, для которых вопросы проверки

истинности имеют ограниченную сложность, как применительно к базисным термам и отношениям в основной модели, так и относительно реализации списочных операций в суперструктуре. С точки зрения конкретных приложений этой логической системы программирования можно различить два типа решаемых задач. К первому типу относятся локальные задачи построения конкретных вычислений с данными исследуемой области, требующие наличия быстрых способов вычисления этих характеристик по принятию оперативных решений в режиме онлайн. Второй тип задач — это поиск стратегических многоцелевых решений для умных контрактов (smart contract) и принятия решений, которые используют при своём выборе большие данные и требуют поиска и задания уже на языке, допускающем неограниченные кванторы существования.

Для решения задач первого типа в работе [13] было предложено расширить класс термов нашего Σ -языка условными термами, которые могут определяться с применением Δ_0 -формул. В работе было замечено, что такое обогащение понятий Δ_0 -терма и Δ_0 -формулы сохраняет полиномиальность и расширяет выразительные возможности термов для возникающих при обработке данных задач, требующих применимости оператора If-then-else.

В настоящей работе предпринято исследование новых дополнительных конструкций, введение которых сохраняет как полиномиальную сложность термальных функций, так и полиномиальность алгоритма проверки истинности для фиксированных Δ_0 -формул. Оказалось, что набор новых конструкций при этом является достаточным для возникающих проблем в интеллектуальных системах при их спе-

*Институт математики им. С.Л. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск*

*E-mail: s.s.goncharov@math.nsc.ru**E-mail: dsviridenko47@gmail.com

цификации в рамках построенного логического формализма.

Рассмотрим модель \mathfrak{M} сигнатуры σ и определим, следуя [1] и [3], надстройку наследственно конечных списков $HW(\mathfrak{M})$ для модели \mathfrak{M} , расширив сигнатуру σ до σ^* , добавляя стандартные списочные функции языка LISP: $head(x)$, $cons(x, y)$, $tail(x, y)$ и константу nil , а также двуместные предикаты: \in — “быть элементом списка” и \sqsubseteq — “быть начальным сегментом списка”, одноместный предикат \mathcal{U} , выделяющий основное множество базисной структуры \mathfrak{M} . Отношения \in и \sqsubseteq определяют частичные отношения порядка \leq_\in и $\leq_\sqsubseteq = \sqsubseteq$.

Если мы желаем работать в нашем языке с матричными данными, то нам потребуются в задании языковых конструкций, требуемых, скажем, при машинном обучении, уже рекурсивные процедуры. Для этих целей было рассмотрено обогащение конструкции термов рекурсией по спискам. Однако при таком обогащении может увеличиться и класс термальных функций. Так, например, если при примитивно рекурсивном представлении базисной модели класс термальных функций не увеличивается, то при полиномиальном P-, PSPACE-представлении класс термальных функций при использовании рекурсивной схемы уже расширяется до класса примитивно рекурсивных.

В настоящей работе предлагаются два варианта обогащения для построения термов, которые при полиномиальном представлении базисной модели не расширяют класс термальных функций полиномиальной P-, PSPACE-сложности.

Для обогащения $HW(\mathfrak{M})$ модели \mathfrak{M} рассмотрим класс термов с переменными из V и классы Δ_0 -формул, Δ -формул и Σ -формул [1]. Расширим понятие термина в сигнатуре σ^* до класса $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термов, а класс Δ_0 -формул — до класса $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формул, которые определим по индукции, и эти обогащения будут привязаны к нашей модели $HW(\mathfrak{M})$.

Базис индукции: термы сигнатуры σ^* списочной надстройки являются $\Delta_0(\mathfrak{B})$ -термами, а Δ_0 -формулы являются $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формулами.

Шаг индукции:

1. Если $t, q \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термы, то $(f = q) \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формула.

2. Если $t_1, \dots, t_n \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термы, а P — n -местный предикатный символ сигнатуры σ , то $P(t_1, \dots, t_n) \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формула.

3. Если Φ и $\Psi \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формулы, то $\neg\Phi$, $(\Phi \vee \Psi)$, $(\Phi \& \Psi)$, $(\Phi \rightarrow \Psi)$ — также $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формулы.

4. Если x — переменная, $t \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -терм, а $\Phi \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формула, то $\exists x \leq_i t \Phi$, $\forall x \leq_i t \Phi$ — также $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формулы, где $\leq_i \in \{\leq_\in, \sqsubseteq\}$.

5. Условный оператор построения термов. Если $t_0, t_1, \dots, t_{n+1} \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термы, а $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формулы, то выражение $t(\mathbf{v}) \iff \iff \text{Cond}((t_0, \dots, t_{n+1}), (\varphi_0, \dots, \varphi_n))$ с семантикой

$$t(\mathbf{v}) = \begin{cases} t_0(\mathbf{v}), & \text{если } \mathfrak{M} \models \varphi_0(\mathbf{v}), \\ t_1(\mathbf{v}), & \text{если } \mathfrak{M} \models \varphi_1(\mathbf{v}) \& \neg\varphi_0(\mathbf{v}), \\ \dots \\ t_i(\mathbf{v}), & \text{если } \mathfrak{M} \models \varphi_i(\mathbf{v}) \& \neg\varphi_0(\mathbf{v}) \& \dots \& \neg\varphi_{i-1}(\mathbf{v}), \\ \dots \\ t_n(\mathbf{v}), & \text{если } \mathfrak{M} \models \varphi_n(\mathbf{v}) \& \neg\varphi_0(\mathbf{v}) \& \dots \& \neg\varphi_{n-1}(\mathbf{v}), \\ t_{n+1}(\mathbf{v}), & \text{в противном случае} \end{cases}$$

является $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термом.

Определим ещё несколько конструкций для образования термов с помощью ограниченной рекурсии.

6. Оператор ограниченной рекурсии по $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -терму t .

Если $f(x_1, \dots, x_n)$, $h(x_1, \dots, x_n, y, z) \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термы, а $t \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -терм без свободных вхождений переменных, то определим функцию g следующим образом:

а) $g(x_1, \dots, x_n, a) = a$ для любого элемента a из базисной модели \mathfrak{M} ;

б) $g(x_1, \dots, x_n, nil) = f(x_1, \dots, x_n)$;

в) $g(x_1, \dots, x_n, cons(\alpha, b)) = h(x_1, \dots, x_n, \alpha)b$ для списка $cons(\alpha, b)$.

Заметим, что так определённая функция $g(x_1, \dots, x_n, t)$ на нашей супермодели наследственно конечных списков является всюду определённой. Запись $\text{Rec}(t, f, h)$ с семантикой, определённой выше, объявляется $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термом.

7. Оператор b -while выбора элемента из списка, заданного $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термом t с заданным условием относительно отношений \in или \sqsubseteq .

Если $\varphi(x_1, \dots, x_n, x_{n+1}) \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формула и $t \in \Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -терм, то определим в качестве значения функции $G(x_1, \dots, x_n)$ первый элемент $y \in t(x_1, \dots, x_n)$ (первый начальный сегмент $y \sqsubseteq t(x_1, \dots, x_n)$) такой, что выполнено для него условие $\varphi(x_1, \dots, x_n, y)$, если же такого элемента нет, то полагаем $G(x_1, \dots, x_n) = t(x_1, \dots, x_n)$. Терм b -while (φ, t) с данной семантикой объявляется $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термом.

8. Оператор $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -определимой функции с ограничением $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термом t , предложенный А. Нетесовым.

Если $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формула определяет в нашей модели график всюду определённой функции f и $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -терм t мажорирует нашу функцию относительно одного из отношений \in, \sqsubseteq , т.е. для любых значений $f(x) \leq_i t(x)$, где $i \in \{\in, \sqsubseteq\}$, то терм $\text{Lim}(\varphi, t)$, представляющий функцию f , объявляется $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термом.

Других $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термов и $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формул нет.

Из определённых таким образом $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термов и $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формул стандартным образом определим $\Sigma_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формулы.

Заметим, что из определения $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -термов и $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формул можно исключить конструкцию δ , не уменьшая выразительные возможности этого языка в силу определимости конструкции Lim через конструкцию $b\text{-while}$.

Теорема 1. *Любая функция $HW(\mathfrak{B})$, определённая $\Delta_0(B\text{-list})$ -термом t в $HW(\mathfrak{B})$, может быть определена с использованием $b\text{-while}$ -оператора, но без использования конструкции δ , т.е. конструкции $\Delta_0(B\text{-list})$ -определимой функции с ограничением $\Delta_0(B\text{-list})$ -термом t относительно отношений \in или \sqsubseteq .*

Заметим, что при определении расширения Δ_0 -формул (Σ -формул) до $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -формул мы сохраняем полиномиальную вычислимость над полиномиальной моделью. С другой стороны, не любая функция с $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -определимым графиком будет вычислима за полиномиальное время. Для таких функций необходимо рассматривать конструкции, ограничивающие поиск.

Теорема 2. 1) *Для любого полиномиального P-, PSPACE- представления модели $HW(\mathfrak{B})$ и для любой $\Delta_0(\mathfrak{B})$ -формулы φ существует полиномиальный P-, PSPACE-алгоритм, определяющий по формуле φ и любому набору \mathbf{v} из модели $HW(\mathfrak{B})$ выполнимость $HW(\mathfrak{M}) \models \varphi(\mathbf{v})$.*

2) *Для любого полиномиального P-, PSPACE- представления модели $HW(\mathfrak{B})$ и для любого $\Delta_0(B\text{-list})(\mathfrak{B})$ -терма $t(\mathbf{v})$ определённая этим термом функция на модели $HW(\mathfrak{B})$ будет полиномиальной P-, PSPACE- сложности.*

Заметим, что в любой модели $HW(\mathfrak{B})$ всегда есть множество натуральных чисел Nat , которое состоит из пустого списка и списков, состоящих из пустых списков. Прибавление единицы в Nat есть термальная операция, а отношение порядка определяется отношением “быть начальным списком”. Так, опре-

делённое множество Nat будет Δ_0 -определимым. Добавим также в качестве базисных операций в модель $HW(\mathfrak{B})$ операции сложения и умножения на списочных представлениях натуральных чисел Nat . Используя эти функции, определим на модели $HW(\mathfrak{B})$ новые функции: $\text{lh}(\lambda)$ -функция, определяющая длину последовательности λ ; $\text{change}(\lambda, i, \beta)$ -функция, заменяющая i -й элемент в последовательности λ на элемент β для $0 < i \leq \text{lh}(\lambda)$, а в других случаях выдающая λ без изменений; $\text{conc}(\alpha, \beta)$ -функция, определяющая конкатенацию списков λ и β , а также $\text{cons}_1(\alpha, \beta)$, которая добавляет в список α элемент β в качестве первого элемента.

Теорема 3. *Для любой полиномиальной P-, PSPACE- модели \mathfrak{M} существует полиномиальное P-, PSPACE-представление модели $HW(\mathfrak{B})$ с полиномиально P-, PSPACE-вычислимыми функциями: $\text{lh}(\lambda)$, $r(\lambda)$, $\text{change}(\lambda, i, \beta)$, $\text{conc}(\alpha, \beta)$, $\text{cons}_1(\alpha, \beta)$.*

Расширим нашу конструкцию построения термов ещё одним оператором “Iteration”. В этом случае мы расширим множества термов и формул до множеств $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -термов, $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -формул и $\Sigma(\mathfrak{J})$ -формул, которые определяются индуктивно с добавлением новой конструкции.

9. Оператор “Iteration”: Пусть $g(\mathbf{x}, v)$ — $\Delta_0^*(\mathfrak{J})$ -терм, и существуют $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -термы q и p , $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -формула ψ такие, что $r(g^i(\mathbf{x}, v))$ меньше $r(q(\mathbf{x}, v))$, и для любых \mathbf{x}, v найдётся $i < (r(p(\mathbf{x}, v)))$ такое, что выполнено $\varphi(g^i(\mathbf{x}, v))$, где

$$g^0(\mathbf{x}, v) = g(\mathbf{x}, v)$$

и

$$g^{i+1}(\mathbf{x}, v) = g(\mathbf{x}, g^i(\mathbf{x}, v)).$$

В этом случае определим в качестве $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -терма $t(\mathbf{x}, v)$ -конструкцию, которая принимает значение, равное $g^i(\mathbf{x}, v)$ для первого i такого, что выполнено $\varphi(g^i(\mathbf{x}, v))$. Заметим, что функция сложности r на списках, замкнутых термах и замкнутых формулах задаётся с целью оценки сложности строения данных выражений. Если задана некая полиномиальная нумерация v модели \mathfrak{M} , то строим полиномиальное представление модели $HW(\mathfrak{B})$ и множества термов и Δ_0 -формул, следуя конструкции из [12], а также полиномиальную функцию r на номерах списков, замкнутых термов и замкнутых формул, которая будет определять сложность этих конструкций.

Теорема 4. *Существует полиномиальный P-, PSPACE-алгоритм, строящий по любой $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -формуле φ такие Σ -формулы ψ_1 и ψ_2 , что*

$$HW(\mathfrak{M}) \models (\forall \mathbf{v})(\varphi(\mathbf{v}) \Leftrightarrow \psi_1(\mathbf{v})),$$

$$HW(\mathfrak{M}) \models (\forall \mathbf{v})(\neg\varphi(\mathbf{v}) \Leftrightarrow \psi_2(\mathbf{v})),$$

т.е. каждая Δ_0^* -формула и её отрицание определимы Σ -формулами без добавленных новых операторов.

Из этой теоремы получаем важное следствие о консервативности полученного расширения на Σ -формулах.

С л е д с т в и е. Для любой $\Sigma(B\text{-list})(\mathfrak{M})$ -формулы φ существует Σ -формула ψ такая, что

$$HW(\mathfrak{M}) \models (\forall \mathbf{v})(\varphi(\mathbf{v}) \Leftrightarrow \psi(\mathbf{v})).$$

Теорема 5. 1) Для любого полиномиального P -, $PSPACE$ -представления $HW(\mathfrak{M})$ с полиномиальной функцией r P -, $PSPACE$ -сложности r и $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -формулы φ существует полиномиальный P -, $PSPACE$ -алгоритм проверки истинности этой формулы, т.е. $HW(\mathfrak{M}) \models \varphi(\mathbf{v})$ на любом списке \mathbf{v} из модели $HW(\mathfrak{M})$.

2) Для любого полиномиального P -, $PSPACE$ -представления модели $HW(\mathfrak{M})$ с полиномиальной P -, $PSPACE$ -функцией r и для любого $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -терма $t(\mathbf{v})$ определённая этим термом функция на модели $HW(\mathfrak{M})$ будет полиномиальной P -, $PSPACE$ -сложности.

Заметим, что при таком обогащении оказывается справедлив следующий результат.

Теорема 6. Для любого полиномиального P -, $PSPACE$ -представления модели $HW(\mathfrak{M})$ с полиномиальной функцией r и для любой полиномиально вычислимой как по пространству, так и по времени всюду определённой P -, $PSPACE$ -функции на натуральных числах Nat существует $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -терм $t(\mathbf{v})$ такой, что определённая этим термом функция на модели $HW(\mathfrak{M})$ в точности определяет данную функцию на базисной модели \mathfrak{N} , в качестве которой взята стандартная модель арифметики со стандартным полиномиальным представлением.

Проблема. При каких условиях для полиномиального P -, $PSPACE$ -представления модели $HW(\mathfrak{M})$ любая полиномиально P -, $PSPACE$ -вычислимая и Σ -определимая функция в $HW(\mathfrak{M})$ может быть определена $\Delta_0(\mathfrak{J})$ -термом $t(\mathbf{v})$.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект 17–11–01176).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров С.С., Свириденко Д.И. // Вычисл. системы. 1985. В. 107. С. 3–29.
2. Goncharov S.S., Sviridenko D.I. // Lect. Notes in Comput. Sci. 1986. V. 215. P. 169–179.
3. Ershov Yu.L., Goncharov S.S., Sviridenko D.I. Inform. proces., Proc. IFIP 10-th World Comput. Congr. Dublin, 1986. V. 10. P. 1113–1120.
4. Гончаров С.С., Свириденко Д.И. // ДАН. 1986. Т. 289. № 6. С. 1324–1328.
5. Ershov Yu.L., Goncharov S.S., Sviridenko D.I. // Lect. Notes in Comput. Sci. 1987. V. 278. P. 116–122.
6. Ершов Ю.Л. // ДАН. 1983. Т. 270. № 4. С. 786–788.
7. Ершов Ю.Л. // ДАН. 1983. Т. 273. № 5. С. 1045–1048.
8. Ershov Yu.L. Definability and Computability. Siberian School of Algebra and Logic. N.Y.: Consultants Bureau, 1996. 264 p.
9. Barwise J. Admissible Sets and Structures. Berlin: Springer, 1975. 394 p.
10. Arora S., Barak B. Computational Complexity. A Modern Approach. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. 605 p.
11. Papadimitriou Ch. Computational Complexity. Reding: Addison-Wesley, 1994. 523 p.
12. Ospichev S.S., Ponomarev D. // Siberian Electronic Math. Reps. 2018. V. 15. P. 987–995.
13. Гончаров С.С. // Сиб. мат. журн. 2017. Т. 58. № 5. С. 1026–1034.

LOGICAL LANGUAGE OF DESCRIPTION OF POLYNOMIAL COMPUTING

Academician of the RAS S. S. Goncharov, D. I. Sviridenko

Received October 16, 2018

An expansion of the term concept and, accordingly, the formula due to new operators were constructed. These extensions of the language preserve the expressiveness of Σ -formulas, and at the level of Δ_0 -formulas and terms, they ensure the polynomiality of algorithms for calculating the value of a term and the truth of a Δ_0 -formula.

Keywords: logic, bounded quantifiers, hereditarily finite list, computable model, term, conditional term, recursive term, formula, Σ -formula, Δ_0 -formula, polynomial algorithms, polynomial model, semantic programming.

УДК 519.853.62

ПРЯМО-ДВОЙСТВЕННЫЙ УСКОРЕННЫЙ ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД С ОДНОМЕРНЫМ ПОИСКОМ ДЛЯ ВЫПУКЛЫХ, НЕВЫПУКЛЫХ И НЕГЛАДКИХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ

С. В. Гуминов^{1,4,*}, Ю. Е. Нестеров^{2,3}, П. Е. Двуреченский^{4,5}, А. В. Гасников^{1,4}

Представлено академиком РАН К.В. Рудаковым 10.09.2018 г.

Поступило 27.09.2018 г.

Представлен новый ускоренный градиентный метод оптимизации. Данный метод не требует никакой априорной информации о целевой функции, использует процедуру одномерного поиска для ускорения сходимости на практике, сходится согласно известным нижним оценкам как для выпуклых, так и невыпуклых целевых функций и обладает свойством прямо-двойственности. Также представлена универсальная версия данного метода.

Ключевые слова: ускоренный градиентный спуск, одномерный поиск, прямо-двойственные методы, выпуклая оптимизация, невыпуклая оптимизация.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485115-18>

В конце 80-х годов А.С. Немировский показал, что вспомогательная маломерная оптимизация не улучшает теоретическую оценку скорости сходимости оптимального метода первого порядка решения гладких выпуклых задач минимизации [1]. Однако на практике ускоренные методы с одномерным поиском (в частности, методы сопряжённых градиентов) обычно оказываются эффективнее своих аналогов с фиксированными длинами шагов в смысле числа итераций. Более того, подобные процедуры успешно применялись для решения невыпуклых задач оптимизации [2]. К сожалению, также хорошо известно, что прирост производительности за счёт использования процедур одномерного поиска значительно уменьшается из-за вычислительной сложности подобных процедур. В работе [3] было замечено, что для задач определённого вида, который часто встречается при решении двойственных задач, сложность выполнения шага одномерного поиска практически совпадает со сложностью выполнения обычного градиентного шага. Этот

факт побуждает интерес к исследованию методов с одномерным поиском и их прямо-двойственности [4–8].

Рассмотрим задачу минимизации

$$f(x) \rightarrow \min_{x \in \mathbb{R}^n}.$$

Решение этой задачи обозначим за x_* . Будем предполагать, что целевая функция дифференцируема, а её градиент удовлетворяет условию Липшица с константой L : для всех $x, y \in \mathbb{R}^n$

$$\|\nabla f(y) - \nabla f(x)\|_2 \leq L\|x - y\|_2.$$

Введём оценивающую последовательность $\{\psi_k(x)\}$ [1, 4, 9, 10] и последовательность коэффициентов $\{A_k\}$

$$\begin{aligned} l_k(x) &= \sum_{i=0}^k a_{i+1} \{f(y^i) + \langle \nabla f(y^i), x - y^i \rangle\}, \\ \psi_{k+1}(x) &= l_k(x) + \psi_0(x) = \\ &= \psi_k(x) + a_{k+1} \{f(y^k) + \langle \nabla f(y^k), x - y^k \rangle\}, \\ A_{k+1} &= A_k + a_{k+1}, \quad A_0 = 0. \end{aligned}$$

Опишем ускоренный метод с одним одномерным поиском AGM.

Алгоритм 1 AGM

Input: $x^0 = v^0, L, N$

Output: x^N

1: $k = 0$

2: **while** $k \leq N - 1$ **do**

3: $\beta_k = \arg \min_{\beta \in [0,1]} f(v^k + \beta(x^k - v^k))$

¹Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный Московской обл.

²Center for Operations Research and Econometrics (CORE), Catholic University of Louvain, Belgium

³Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва

⁴Институт проблем передачи информации Российской Академии наук, Москва

⁵Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics, Berlin, Germany

*E-mail: sergey.guminov@phystech.edu

$$4: y^k = v^k + \beta_k(x^k - v^k)$$

$$5: x^{k+1} = y^k - \frac{1}{L} \nabla f(y^k)$$

$$6: \text{Выбрать } a_{k+1} \text{ как решение } \frac{a_{k+1}^2}{A_{k+1}} = \frac{1}{L}$$

$$7: v^{k+1} = v^k - a_{k+1} \nabla f(y^k)$$

$$\triangleright v^{k+1} = \arg \min_{x \in \mathbb{R}^n} \psi_{k+1}(x)$$

$$8: k = k + 1$$

9: **end while**

Основным отличием данного алгоритма от известных похожих ускоренных градиентных методов [4, 10, 11] является выбор шага в строке 3. Предыдущие алгоритмы использовали фиксированную длину шага (например, $\beta_k = \frac{k}{k+2}$).

Вместо шага 5 могут быть использованы различные правила выбора шага, такие как правило Армихо [2] и его современные аналоги (как в универсальном быстром градиентном методе [12]). Версия метода, использующая для выбора шага точный одномерный поиск, будет называться ALSM.

Алгоритм 2 ALSM

Input: $x^0 = v^0$

Output: x^N

$$1: k = 0$$

2: **while** $k \leq N - 1$ **do**

$$3: \beta_k = \arg \min_{\beta \in [0,1]} f(v^k + \beta(x^k - v^k))$$

$$4: y^k = v^k + \beta_k(x^k - v^k)$$

$$5: h_{k+1} = \arg \min_{h \geq 0} f(y^k - h \nabla f(y^k))$$

$$6: x^{k+1} = y^k - h_{k+1} \nabla f(y^k)$$

7: Выбрать a_{k+1} как решение

$$f(y^k) - \frac{a_{k+1}^2}{2A_{k+1}} \|\nabla f(y^k)\|_2^2 = f(x^{k+1})$$

$$8: v^{k+1} = v^k - a_{k+1} \nabla f(y^k)$$

$$\triangleright v^{k+1} = \arg \min_{x \in \mathbb{R}^n} \psi_{k+1}(x)$$

$$9: k = k + 1$$

10: **end while**

Сформулируем основные теоретические результаты для данных методов.

Теорема 1. Для обоих методов AGM и ALSM

$$\min_{k=0, \dots, N} \|\nabla f(y^k)\|_2^2 \leq \frac{2L(f(x^0) - f(x_*))}{N}.$$

Если $f(x)$ выпукла, то для обоих методов

$$\min_{k=\lfloor N/2 \rfloor, \dots, N} \|\nabla f(y^k)\|_2^2 \leq \frac{32L^2R^2}{N^3},$$

$$f(x^N) - f(x_*) \leq \frac{2LR^2}{N^2},$$

где $R = \|x_* - x^0\|_2$.

Функция $f(x)$ называется γ -слабо-квазивыпуклой (где $\gamma \in (0, 1]$), если для всех $x \in \mathbb{R}^n$

$$\gamma(f(x) - f(x_*)) \leq \langle \nabla f(x), x - x_* \rangle,$$

γ -слабо-квазивыпуклые функции являются унимодальными, но в общем случае не являются выпуклыми. Если $f(x)$ γ -слабо-квазивыпукла, то можно рассмотреть метод AGM со следующей процедурой рестартов: как только

$$f(x_i^N) - f(x_*) \leq \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right)(f(x_i^0) - f(x_*)),$$

объявить $x_{i+1}^0 = x_i^N$ и перезапустить метод.

Теорема 2. Если $f(x)$ γ -слабо-квазивыпукла, то для методов AGM и ALSM с вышеописанной процедурой рестартов верно

$$f(\tilde{x}^N) - f(x_*) = O\left(\frac{LR^2}{\gamma^3 N^2}\right),$$

где $R = \max_{x: f(x) \leq f(x_0)} \|x\|_2$, а $\{\tilde{x}^i\}$ — последовательность точек, которые генерирует метод по ходу всех запусков.

Заметим, что метод SESOP [3] может быть применён к γ -слабо-квазивыпуклым задачам и имеет оценку скорости сходимости

$$f(\tilde{x}^N) - f(x_*) = O\left(\frac{LR^2}{\gamma^2 N^2}\right)$$

с $R = \|x^0 - x_*\|_2$, но требует решения трёхмерной (возможно, невыпуклой) задачи на каждой итерации. Напротив, описанный в данной работе метод AGM требует лишь решения задачи минимизации на отрезке.

Теперь рассмотрим выпуклую задачу вида

$$\phi(z) \rightarrow \min_{Az=0}. \quad (1)$$

В этом случае можно построить двойственную задачу минимизации

$$\begin{aligned} f(x) &= \max_z \{ \langle x, Az \rangle - \phi(z) \} = \\ &= \langle x, Az(x) \rangle - \phi(z(x)) \rightarrow \min_{x \in \mathbb{R}} \end{aligned}$$

Согласно теореме Демьянова—Данскина $\nabla f(x) = Az(x)$. Предположим, что $\phi(x)$ μ -сильно выпукла. Тогда $\nabla f(x)$ удовлетворяет условию Липшица с константой $L = \frac{\lambda_{\max}(A)}{\mu}$. Применим к задаче (1) наши методы с $x^0 = v^0 = 0$. Определим

$$\tilde{z}^N = \frac{1}{A_N} \sum_{k=0}^{N-1} a_{k+1} z(y^k).$$

Теорема 3. Для методов AGM и ALSM

$$f(x^N) + \phi(\tilde{z}^N) \leq \frac{16LR^2}{N^2},$$

$$\|A\tilde{z}^N\|_2 \leq \frac{16LR}{N^2},$$

где $R = \|x^*\|_2$.

Рассмотрим класс задач, в котором целевая функция $f(x)$ не обязательно гладкая, и будем обозначать за $\nabla f(x)$ некоторый её субградиент. Предположим, что $\nabla f(x)$ удовлетворяет условию Гёльдера: для всех $x, y \in \mathbb{R}^n$ и некоторого $v \in [0, 1]$

$$\|\nabla f(y) - \nabla f(x)\|_2 \leq M_v \|x - y\|_2^v.$$

Для решения данного класса задач можно предложить следующий метод ULSM.

Алгоритм 3 ULSM

Input: Начальная точка $x^0 = v^0$, точность ε

Output: x^N

1: $k = 0$

2: **while** $k \leq N - 1$ **do**

3: $\beta_k = \arg \min_{\beta \in [0,1]} f(v^k + \beta(x^k - v^k))$

4: $y^k = v^k + \beta_k(x^k - v^k)$

5: $h_{k+1} = \arg \min_{h \geq 0} f(y^k - h\nabla f(y^k))$,

где $\langle \nabla f(y^k), v^k - y^k \rangle \geq 0$

6: $x^{k+1} = y^k - h_{k+1} \nabla f(y^k)$

7: Выбрать a_{k+1} как решение

$$f(x^{k+1}) = f(y^k) - \frac{a_{k+1}^2}{2A_{k+1}} \|\nabla f(y^k)\|_2^2 + \frac{\varepsilon a_{k+1}}{2A_{k+1}}$$

8: $v^{k+1} = v^k - a_{k+1} \nabla f(y^k)$

▷ $v^{k+1} = \arg \min_{x \in \mathbb{R}^n} \psi_{k+1}(x)$

9: $k = k + 1$

10: **end while**

Заметим, что в отличие от других универсальных методов [12, 13] данный метод не требует оценивания требуемой длины шага во внутреннем цикле.

Это приводит к несколько лучшей оценке скорости сходимости и в среднем меньшему числу обращений к оракулу за итерацию.

Теорема 4. Если $f(x)$ выпукла и её субградиент удовлетворяет условию Гёльдера, то верно

$$f(x^N) - f(x^*) \leq \frac{1}{2A_N} \|x^0 - x^*\|_2^2 + \frac{\varepsilon}{2},$$

т.е. решение с точностью ε генерируется методом за число итераций

$$N \leq \inf_{v \in [0,1]} 2 \left[\frac{1-v}{1+v} \right]^{1+3v} \left[\frac{M_v}{\varepsilon} \right]^{1+3v} R^{\frac{2}{1+3v}},$$

где $R = \|x_0 - x^*\|_2$.

Отметим, что если рассматриваемая задача сильно выпукла с известной константой μ , то рассмотрение оценивающей последовательности

$$\psi_{k+1}(x) = l_k(x) + \psi_0(x) = \psi_k(x) + a_{k+1} \left\{ f(y^k) + \langle \nabla f(y^k), x - y^k \rangle + \frac{\mu}{2} \|x - y^k\|_2^2 \right\}$$

приводит к аналогам вышеописанных методов, оптимальных (с точностью до мультипликативной константы) в классе сильно выпуклых задач.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект 18–71–10108).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестеров Ю.Е. Эффективные методы в нелинейном программировании. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.
2. Waltz R.A., Morales J.L., Nocedal J., Orban D. An Interior Algorithm for Nonlinear Optimization that Combines Line Search and Trust Region Steps // Math. Progr. 2006. V. 107. № 3. P. 391–408.
3. Narkiss G., Zibulevsky M. Sequential Subspace Optimization Method for Large-Scale Unconstrained Problems. Tech. Report CCIT № 559. Haifa: EE Dept. Technion, 2005.
4. Nesterov Yu. Smooth Minimization of Non-Smooth Functions // Math. Progr. 2005. V. 103. № 1. P. 127–152.
5. Nesterov Yu. Primal-Dual Subgradient Methods for Convex Problems // Math. Progr. 2009. V. 120. № 1. P. 221–259.
6. Dvurechensky P., Gasnikov A., Kroshnin A. Computational Optimal Transport: Complexity by Accelerated Gradient Descent Is Better Than by Sinkhorn's Algorithm. Proc. of the 35th International Conference on Machine Learning. Stockholm: PMLR, 2018. P. 1367–1376.
7. Dvurechensky P., Gasnikov A., Matsievsky S., Rodomanov A., Usik I. Primal-Dual Method for Searching

- Equilibrium in Hierarchical Congestion Population Games CEUR-WS // Supplementary Proc. the 9th Intern. Conf. on Discrete Optimization and Operations Research and Scientific School (DOOR 2016). В.: Springer, 2016. P. 584–595. <http://ceurws.org/Vol-1623/>
8. *Chernov A., Dvurechensky P., Gasnikov A.* Fast Primal-Dual Gradient Method for Strongly Convex Minimization Problems with Linear Constraints // Proceeding of the 9th Intern. Conf. on Discrete Optimization and Operations Research (DOOR 2016). В.: Springer, 2016. P. 391–403.
 9. *Нестеров Ю.Е.* Метод решения задач выпуклого программирования с трудоемкостью $O(1/k^2)$ // ДАН. 1983. Т. 269. № 3. С. 543–547.
 10. *Нестеров Ю.Е.* Введение в выпуклую оптимизацию. М.: МЦНМО, 2010. 280 с.
 11. *Allen-Zhu Z., Orecchia L.* Linear Coupling: An Ultimate Unification of Gradient and Mirror Descent. Proc. of the 8th Innovations in Theoretical Computer Science. Saarbrücken: Schloss Dagstuhl, 2017.
 12. *Nesterov Yu.* Universal Gradient Methods for Convex Optimization Problems // Math. Progr. 2015. V. 152. № 1/2. P. 381–404.
 13. *Guminov S., Gasnikov A., Anikin A., Gornov A.* A Universal Modification of the Linear Coupling Method // Optim. Met. and Soft. 2018. DOI: 10.1080/10556788.2018.1517158.

PRIMAL-DUAL ACCELERATED GRADIENT DESCENT WITH LINE SEARCH FOR CONVEX AND NONCONVEX OPTIMIZATION PROBLEMS

S. V. Guminov, Yu. E. Nesterov, P. E. Dvurechensky, A. V. Gasnikov

Presented by Academician of the RAS K.B. Rudakov September 10, 2018

Received September 27, 2018

In this paper a new variant of accelerated gradient descent is proposed. The proposed method does not require any information about the objective function, uses exact line search for the practical accelerations of convergence, converges according to the well-known lower bounds for both convex and non-convex objective functions and possesses primal-dual properties. We also provide a universal version of said method, which converges according to the known lower bounds for both smooth and non-smooth problems.

Keywords: accelerated gradient descent, line-search, primal-dual methods, convex optimization, nonconvex optimization.

УДК 519.615

2-ФАКТОРМЕТОД НЬЮТОНА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УСЛОВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ВЫРОЖДЕННОЙ СИСТЕМОЙ КУНА—ТАККЕРА

Академик РАН Ю. Г. Евтушенко^{1,2,3,*}, А. А. Третьяков^{1,4,5,**}

Поступило 14.11.2018 г.

Предлагается новый метод решения задачи условной оптимизации с ограничениями неравенствами для случая, когда система необходимых условий оптимальности Куна—Таккера вырождена. Такая ситуация возникает, например, при невыполнении условий строгой дополняющей нежёсткости в решении. Обосновывается сведение задачи с неравенствами к задаче с равенствами и использование нового 2-факторметода Ньютона для эффективного решения полученной вырожденной системы условий оптимальности.

Ключевые слова: 2-факторметод Ньютона, необходимые условия оптимальности Куна—Таккера, вырожденность, сходимость, искусственные переменные, сводимость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485119-21>

При решении оптимизационных задач с ограничениями типа неравенства возникает идея свести неравенства к равенствам путём добавления искусственных переменных. Однако для того чтобы система необходимых условий экстремума Куна—Таккера (К—Т) [6] была невырожденной, необходимо вводить условия строгой дополнительной нежёсткости. В противном случае нельзя гарантировать применимость высокоэффективных методов типа Ньютона. Поэтому такая редукция, как сказано в [3, 4], не представлялась перспективной. В данной работе мы покажем эффективность указанного подхода с точки зрения применения 2-факторметода для решения системы вырожденных условий оптимальности и докажем, что система К—Т 2-регулярна.

Пусть \mathbb{R}^n есть n -мерное пространство, задана целевая функция $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^1$ и вектор-функция $g(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, определяющая допустимое множество

$$X = \{x \in \mathbb{R}^n: g(x) \leq 0_m\},$$

здесь 0_m есть m -мерный нулевой вектор, $g(x) = (g^{(1)}(x), \dots, g^{(m)}(x))^T$. Ставится задача минимизации функции $f(x)$ на X

$$\min_{x \in X} f(x). \quad (1)$$

Наличие ограничения типа неравенства в определении множества X усложняет применение метода Ньютона для численного решения задачи (1). В [3] эта трудность преодолевалась путём перехода к ограничениям типа равенства. Для этого вводился вектор $s \in \mathbb{R}^m$ и допустимое множество представлялось в виде

$$\bar{X} = \{x \in \mathbb{R}^n, s \in \mathbb{R}^m: g(x) + D(s)s = 0_m\},$$

где $D(a)$ — диагональная матрица, у которой на главной диагонали стоит вектор a , размеры матрицы D определяются размерностью вектора a .

В дальнейшем рассматриваем задачу минимизации

$$\min_{(x,s) \in \bar{X}} f(x). \quad (2)$$

Задачи минимизации $f(x)$ по x на X и по x, s на \bar{X} эквивалентны.

Для задачи (2) введём функцию Лагранжа

$$L(u) \triangleq f(x) + \lambda^T [g(x) + D(s)s],$$

здесь $s, \lambda \in \mathbb{R}^m, u^T = [x^T, s^T, \lambda^T] \in \mathbb{R}^\ell, \ell = n + 2m$.

Введём систему из ℓ нелинейных уравнений с ℓ неизвестными

¹ Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
Федерального исследовательского центра
“Информатика и управление”

Российской Академии наук, Москва

² Московский физико-технический институт
(государственный университет),
Долгопрудный Московской обл.

³ Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

⁴ System Research Institute Polish Academy Sciences,
Warsaw, Poland

⁵ Siedlce University, Poland

*E-mail: yuri-evtushenko@yandex.ru

**E-mail: tret@ap.siedlce.pl

$$L_u(u) = 0_\ell. \quad (3)$$

Её решение $u_*^\top = (x_*^\top, s_*^\top, \lambda_*^\top) \in \mathbb{R}^\ell$. Если $\lambda_* \geq 0_m$, $L_u(u_*) = 0_\ell$, то в точке (x_*, λ_*) выполнены необходимые условия минимума в задаче (1) (условия Куна—Таккера). Поэтому заменим условие неотрицательности λ на уравнение

$$\lambda - D(\omega)\omega = 0_m, \quad (4)$$

где ω есть m -мерный вектор. Рассмотрим расширенную систему

$$\Psi(z) = \begin{cases} L_u(u) = 0_\ell \\ \lambda - D(\omega)\omega = 0_m \end{cases} = 0_r, \quad (5)$$

где $z^\top = (x^\top, s^\top, \lambda^\top, \omega^\top)$, $r = n + 3m$. Таким образом, исходная задача, содержащая неравенства, сведена к системе равенств. Причём в её решении (x_*, λ_*) выполнены необходимые условия Куна—Таккера.

Пусть $I(x) = \{1 \leq i \leq m: g^{(i)}(x) = 0\}$. В точке x выполнено условие регулярности ограничений (УРО), если все векторы $g_x^{(i)}(x)$, $i \in I(x)$, линейно независимы. В точке z_* выполнено условие строгой дополняющей нежёсткости (УСДН), если все $\lambda_*^{(i)}$, $s_*^{(i)}$ не равны нулю одновременно, $1 \leq i \leq m$.

Если в точке z_* имеют место условия (5) и

$$x^\top L_{xx}(u_*)x > 0 \quad \forall x \neq 0_n \quad g_x^{(i)}(x_*)x \leq 0, \quad i \in I(x_*), \quad (6)$$

тогда x_* — точка строгого локального минимума в задаче (1), т.е. выполнены достаточные условия строгого минимума второго порядка (см., например, [5]).

Применим метод Ньютона к решению системы (5), тогда получим итерационный процесс

$$z_{k+1} = z_k - (\Psi_z(z_k))^{-1} \Psi(z_k). \quad (7)$$

Если в решении z_* не выполнено УСДН, то матрица $\Psi_z(z_*)$ вырождена и метод (7) не гарантирует сходимость. Построим так называемый 2-факторметод Ньютона, обеспечивающий квадратичную скорость сходимости.

В общем случае схемы 2-факторметода решение системы нелинейных уравнений

$$\Phi(y) = 0_r \quad (8)$$

при $y \in \mathbb{R}^r$ имеет следующий вид:

$$y_{k+1} = y_k - \{\Phi_y(y_k) + \mathcal{P}\Phi_{yy}(y_k)h\}^{-1} \times \\ \times (\Phi(y_k) + \mathcal{P}\Phi_y(y_k)h), \quad (9)$$

где \mathcal{P} — матрица ортогонального проектирования на $(\text{Im } \Phi_y(y_*))^\perp$, а $h \in \mathbb{R}^r$ — некоторый фиксирован-

ный вектор, $\|h\| = 1$, такой, что матрица $\{\Phi_y(y_*) + \mathcal{P}\Phi_{yy}(y_*)h\}$ невырождена, т.е. отображение $\Phi(\cdot)$ — 2-регулярно на векторе h в точке y_* решения системы (8). В этом случае справедлива следующая

Теорема 1. Пусть $\Phi \in C^3(\mathbb{R}^r)$ и $\Phi(\cdot)$ — 2-регулярно в решении y_* на векторе h . Тогда при $y_0 \in U_\varepsilon(y_*)$ для схемы (9) справедлива оценка скорости сходимости

$$\|y_{k+1} - y_*\| \leq c \|y_k - y_*\|^2, \quad k = 0, 1, \dots, \quad (10)$$

где $\varepsilon > 0$ достаточно малое (см. пример 2).

Доказательство см., например, в [2].

Следуя [1, 2], введём отображение

$$F(z) = \Psi(z) + \mathcal{P}\Psi_z(z)h$$

и 2-фактороператор

$$F_z(z) = \Psi_z(z) + \mathcal{P}\Psi_{zz}(z)h,$$

где $(r \times r)$ -матрица \mathcal{P} проектирует вектор $\Psi_{zz}(z_k)h$ на $(\text{Im } \Psi_z(z_*))^\perp$, r -мерный вектор h , имеющий единичную норму, выбирается из условия невырожденности $F_z(z_*)$, причём здесь z_* — априори неизвестный вектор. Отметим, что матрицу \mathcal{P} , вообще говоря, можно выбирать просто из условия невырожденности 2-фактороператора $F_z(z_*)$.

Рассмотрим систему, аналогичную (5):

$$F(z) = 0_r. \quad (11)$$

В случае вырождения $\Psi_z(z_*)$ матрица \mathcal{P} ненулевая и решение системы (11) локально совпадает с z_* . Предполагая, что f и g принадлежат классу C^3 , вычислим производную $F_z(z_*)$.

Теорема 2. Пусть $f, g \in C^3(\mathbb{R}^n)$, существует удовлетворяющий системе (5) вектор z_* , в точке x_* выполнены достаточные условия оптимальности (6) и условие регулярности ограничений. Тогда существует вектор $h \neq 0$ такой, что 2-факторматрица $F_z(z_*)$ не вырождена.

Метод Ньютона, применённый к системе (11), имеет вид

$$z_{k+1} = z_k - (F_z(z_k))^{-1} F(z_k), \quad k = 0, 1, \dots \quad (12)$$

или

$$z_{k+1} = z_k - (\Psi_z(z_k) + \mathcal{P}\Psi_{zz}(z_k)h)^{-1} \times \\ \times (\Psi(z_k) + \mathcal{P}\Psi_z(z_k)h) \quad (13)$$

и называется 2-факторметодом решения системы (5).

Теорема 3. Пусть $\Psi \in C^3(\mathbb{R}^r)$ и для $h \in \mathbb{R}^r$, $\|h\| \neq 0$, существует $\{F_z(z_*)\}^{-1}$. Тогда 2-факторметод (12), (13) сходится к решению z_* системы (11) с квадратичной скоростью, т.е.

$$\|z_{k+1} - z_*\| \leq c \|z_k - z_*\|^2, \quad k = 0, 1, \dots,$$

где $z_0 \in U_\varepsilon(z_*)$, $\varepsilon > 0$ достаточно малое, а $c > 0$ — независимая константа.

Доказательство приведено в [2].

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17–07–00510) и Программы Президиума РАН 27.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брежнева О.А., Евтушенко Ю.Г., Третьяков А.А. Новые численные методы и некоторые прикладные аспекты теории p -регулярности // ЖВМиМФ. 2006. Т. 46. № 11. С. 1987–2000.
2. Белаиш К.Н., Третьяков А.А. Методы решения вырожденных задач // ЖВМиМФ. 1988. Т. 28. № 7. С. 1097–1102.
3. Bertsekas D.P. Nonlinear Programming. Belmont: Athena sci., 1999. P. 1–60.
4. Izmailov A.F., Solodov M.V. Newton-Type Methods for Optimization Problems without Constraint Qualifications // SIAM J. Optimization. 2004. V. 15. № 1. P. 210–228.
5. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983.
6. Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Наука, 2000.

2-FACTOR NEWTON METHOD FOR SOLVING THE CONSTRAINED OPTIMIZATION PROBLEM WITH THE SINGULAR KUHN—TUCKER SYSTEM

Academician of the RAS Yu. G. Evtushenko, A. A. Tret'yakov

Received November 14, 2018

A new method for solving the inequality constrained optimization problem is proposed for the case when the system of necessary optimality conditions of Kuhn—Tucker is degenerate. This situation occurs for example in the case when strict complementarity conditions fails in solution point. The reduction of the inequalities constrained optimization problem to the equalities constrained problem is substantiated and the use of a new 2-factor Newton method for the effective solution of the obtained degenerate system of optimality conditions is shown.

Keywords: 2-factor Newton method, necessary Kuhn—Tucker optimality conditions, degenerate, convergence, slack variables, reduction.

УДК 512.745.2

СЛОЖНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РЕДУКТИВНЫХ ГРУПП НАД АЛГЕБРАИЧЕСКИ НЕЗАМКНУТЫМ ПОЛЕМ И СИЛЬНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЙ НА ФЛАГОВЫХ МНОГООБРАЗИЯХ

В. С. Жгун^{1,2,*}, Ф. Кноп³

Представлено академиком РАН В.П. Платоновым 08.10.2018 г.

Поступило 03.09.2018 г.

В работе доказаны результаты, обобщающие теорему Э.Б. Винберга о сложности многообразий с действием редуктивной алгебраической группы на случай алгебраически незамкнутого поля. Также приведены результаты о сильной k -стабильности для действий на многообразиях флагов.

Ключевые слова: редуктивные алгебраические группы, сложность действий над алгебраически незамкнутыми полями, орбиты минимальной параболической подгруппы, стабильность действий, разложение Брюа.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485122-26>

Пусть k — поле характеристики нуль с алгебраическим замыканием K . G — связная редуктивная k -группа, действующая на алгебраическом k -многообразии X . Цель настоящего сообщения — анонсировать и привести схему доказательства результатов, обобщающих теорему Э.Б. Винберга [1] о сложности многообразий с действием редуктивной алгебраической группы на случай алгебраически незамкнутого поля.

Размерность многообразий мы всегда будем рассматривать над полем K . Для алгебраического многообразия X или алгебраической группы H , определённых над k , множество их k -точек обозначим через X_k, H_k соответственно.

Определение 1. Линейная k -группа G называется анизотропной, если она связна, редуктивна и не содержит расщепимых k -подторов.

Согласно [2, 8.5] анизотропность группы G эквивалентна полупростоте элементов из G_k и тривиальности $\text{Hom}_k(G, \mathbb{G}_m) = 1$. Если опустить последнее условие, то группа G называется элементарной.

В связной редуктивной k -группе G рассмотрим минимальную параболическую k -подгруппу $P \subseteq G$ с разложением $P = L^{\text{an}}SP_u$, где P_u — унипотентный

радикал, L^{an} — максимальная анизотропная подгруппа группы P , а S — максимальный расщепимый тор, который является центральным. Положим $L = L^{\text{an}}S$, $P' = L^{\text{an}}P_u$, а также зафиксируем $T \subseteq L$ — максимальный k -тор в G , содержащий S (такой тор существует по [3, 16.1.1]).

Предложение 1. Пусть Q — k -параболическая подгруппа G , содержащая P , а Y — P -инвариантное k -плотное подмногообразие X . Тогда QY — также k -плотное замкнутое подмногообразие X .

Определение 2. Назовём сложностью $c_P(X)$ минимальную коразмерность P -орбиты в X .

Определение 3. k -плотное G -многообразие X называется k -сферическим, если P имеет открытую орбиту в X .

Предложение 2 [4, 4.4]. Пусть G — анизотропная группа, действующая на квазиаффинном k -многообразии X . Тогда G -орбита точки из X_k замкнута в X .

Предложение 3. Пусть G — анизотропная группа, действующая на k -плотном неприводимом многообразии X . Тогда для G -инвариантного k -плотного подмногообразия Y , не плотного в X , имеем $c_G(Y) < c_G(X)$.

Пусть Q — k -параболическая подгруппа G , собственно содержащая P и не содержащая промежуточных подгрупп. Обозначим через Q_u её унипотентный радикал. Подгруппа Леви M в Q , содержащая S , имеет над k полупростой ранг 1. Рассмотрим $W_Q = N_Q(S)_k / Z_Q(S)_k$. Согласно [2, 5.18] группа W_Q порождена одним элементом $s \in N_Q(S)_k$, нормали-

¹Федеральный научный центр

“Научно-исследовательский институт системных исследований Российской Академии наук”, Москва

²Национальный исследовательский университет

“Высшая школа экономики”, Москва

³Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Deutschland

*E-mail: zhgoon@mail.ru

зующим L . Для множества k -точек разложение Брюа принимает вид

$$Q_k = P_k s P_k \cup P_k.$$

Нами были доказаны следующие теоремы.

Теорема 1. Пусть G — редуктивная алгебраическая группа над совершенным полем k , действующая на k -плотном многообразии X . Пусть Y — P -инвариантное k -плотное подмногообразие X . Тогда $c_P(Y) \leq c_P(X)$, $\text{rk}_P(Y) \leq \text{rk}_P(X)$.

Теорема 2. Пусть G — редуктивная k -группа, действующая на k -сферическом многообразии X . Тогда X имеет конечное число P -орбит с непустым множеством k -точек.

В данной работе мы приведём подробную схему доказательства теоремы 2 и краткую схему доказательства теоремы 1 в случае локально-компактных полей. Несмотря на то что в этом случае доказательства значительно упрощаются, результаты всё равно представляют значительный интерес. Заметим, что в вещественном случае несколько другое доказательство было известно ранее [15].

Доказательство. Рассуждая от противного, рассмотрим P -инвариантное абсолютно неприводимое k -плотное подмножество Y , состоящее из бесконечного числа P -орбит фиксированной размерности. Среди таких множеств возьмём Y максимальной размерности. Если $G\bar{Y} \neq X$, то по предположению индукции по размерности G -многообразия имеем $c_P(Y) \leq c_P(GY)$, в свою очередь, по теореме Ф. Кнопа и Б. Кретца [6, Prop. 4.13] $c_P(GY) \leq c_P(X)$. Тем самым можно считать, что Y не G -инвариантно, а замыкание GY совпадает с X . Для замкнутого подмножества \bar{Y} множество $Q\bar{Y}$ также замкнуто, и либо $Q\bar{Y} = \bar{Y}$, либо $\dim Q\bar{Y} > \dim \bar{Y}$. Заметим, что G порождается произведением параболических подгрупп, которые содержат P , но не имеют промежуточных подгрупп, содержащих P . Поскольку Y не G -инвариантно, существует параболическая подгруппа Q , содержащая P и минимальная с этим свойством, такая что $\dim QY > \dim Y$. По предположению, QY содержит открытую P -орбиту.

Заметим, что для $x \in X$ имеет место соответствие

$$\{P\text{-орбиты в } Q_x\} \leftrightarrow \{\text{двойные классы } PqQ_x \text{ в } Q\} \leftrightarrow \{Q_x\text{-орбиты в } Q/P\}.$$

Это соответствие сохраняет порядок по включению для инвариантных подмножеств, а также сохраняет коразмерности и относительные коразмерности соответствующих инвариантных подмножеств. Тем самым Y соответствует некоторому подмножеству Z в Q/P .

Лемма 1. Если поле k удовлетворяет свойству (F) по Серру [6, III.4.2], из k -плотности Y следует k -плотность Z .

Доказательство. По свойству (F) множество k -точек Qx разлагается в конечное объединение Q_k -орбит

$$(Qx)_k = \bigcup_{x_i \in (Qx)_k} Q_k x_i.$$

Рассмотрим разложение $Z_k = \bigcup_{x_i \in Z_k} Q_k x_i \cap Z$ в конечном объединении подмножеств. Тогда среди них существует плотное в Z подмножество, например $(Z_k)_0$. Для k -точки x имеем соответствие

$$\begin{aligned} & \{P_k\text{-орбиты в } Q_k x\} \leftrightarrow \\ & \leftrightarrow \{\text{двойные классы } P_k q(Q_x)_k \text{ в } Q_k\} \leftrightarrow \\ & \leftrightarrow \{(Q_x)_k\text{-орбиты в } Q_k/P_k\} \leftrightarrow \\ & \leftrightarrow \{(Q_x)_k\text{-орбиты в } (Q/P)_k\}. \end{aligned}$$

Прообраз $(Z_k)_0$ при отображении $Q_k \rightarrow Q_k/(Q_{x_0})_k$ является $(P_k \times (Q_{x_0})_k)$ -инвариантным, откуда его замыкание по Зарисскому \hat{Z} в Q является $(P \times Q_{x_0})$ -инвариантным, а его образ при проекции $Q \rightarrow Q/(Q_{x_0})$ равен замыканию $(Z_k)_0$, т.е. Z . Будучи k -плотным, образ \hat{Z} при проекции $Q \rightarrow Q/P$ также будет k -плотен.

Перейдём к образам групп Q_{x_0} и P в факторе $Q/\text{Rad}Q$. Тогда доказательство будет следовать из следующего предложения.

Предложение 4. Пусть G — редуктивная k -группа расщепимого ранга 1, P — минимальная параболическая подгруппа в G , а H — k -подгруппа в G , такая что H имеет плотную орбиту в G/P . Пусть Z — k -плотное H -инвариантное подмножество, тогда Z имеет плотную H -орбиту.

Доказательство. Группа H может быть одной из следующих типов:

(i) H имеет тривиальный анизотропный радикал. Если H анизотропна, то по предложению 7 множество k -точек составляет одну H -орбиту.

(ii) Предположим, что H имеет тривиальный унипотентный радикал и расщепимый ранг 1, т.е. она содержит расщепимый тор S , который также является максимальным расщепимым в G . Возьмём однопараметрическую подгруппу $\lambda \in S$ и рассмотрим минимальную адаптированную параболическую подгруппу $P(\lambda) \subset G$ и минимальную адаптированную параболическую подгруппу $P_H(\lambda) = P(\lambda) \cap H$. Сопрягая S элементом из G_k , мы можем предполагать, что $P = P(\lambda)$.

Предположим, что стабилизатор H_x точки $x \in (G/P)_k$ содержит подгруппу, изоморфную \mathbb{G}_a или \mathbb{G}_m . Тогда, сопрягая её элементом из H_k , можно считать, что \mathbb{G}_a (соответственно \mathbb{G}_m) лежит в $P_u \cap H$ (соответственно равна S).

Из разложения Брюа $G_k/P_k = (P_u)_k sP_k/P_k \cup P_k/P_k$ следует, что множество неподвижных k -точек относительно $G_a \subset P_u$ (соответственно S) на $(G/P)_k$ состоит из eP/P (соответственно двух точек eP/P и sP/P), и это множество содержится в H -орбите, равной $H/H \cap P$. Это показывает, что если стабилизатор H_x не является анизотропным, то Hx — единственная замкнутая H -орбита с непустым множеством k -точек.

Лемма 2. Пусть X — многообразие с действием k -редуктивной группы G с плотной орбитой. Пусть $x \in X_k$ — гладкая точка из замыкания открытой орбиты, тогда H изотропна.

Доказательство. Предположим противное. Рассмотрим эквивариантное вложение G -инвариантной окрестности в X орбиты с редуктивным стабилизатором в пространство $\mathbb{P}(V)$. Пусть H — стабилизатор прямой $\langle v \rangle \in \mathbb{P}(V)$, поскольку H анизотропна и, в частности, не имеет k -характеров, она также является стабилизатором $v \in V$. Это также показывает, что стабилизатор v в группе $G \times k^\times$ (действующей на аффинном конусе \hat{X} с открытой орбитой) также равен H . Пусть N_x — H -инвариантное дополнительное k -пространство в $T_x X$ к касательному пространству к орбите $T_x(Gx)$. Имеем H -эквивариантное отображение $X \rightarrow T_x X$, которое этально в окрестности x (что легко следует из вычисления дифференциала). Тогда неприводимая компонента S прообраза N_x в X является H° -многообразием, гладким в точке x (где H° — неприводимая компонента единицы) и трансверсальным к Gx . Рассмотрим следующие отображения, этальные в окрестности точки x :

$$X \leftarrow G^*_{H^\circ} S \rightarrow G^*_{H^\circ} N_x.$$

Поскольку G имеет открытую орбиту в X , а оба морфизма конечны, H имеет открытую орбиту в k -векторном пространстве N_x , что противоречит анизотропности H .

Комбинируя вышесказанное, условие сферичности и лемму, получим, что множество $(G/P)_k$ лежит в объединении открытой и замкнутой H -орбиты, где открытая орбита имеет редуктивный анизотропный стабилизатор, а замкнутая орбита является многообразием флагов $H/H \cap P$. Тем самым последняя орбита содержится в Z .

(iii) Пусть H содержит нетривиальный унипотентный радикал, тогда по результату В.П. Платонова [7, 30.3, Сог. А] (см. также [8, 10]) и конструкции Бореля Титса [9] существует параболическая k -подгруппа P_1 в G , такая, что $H \subset P_1$, $\text{Rad } H \subset \text{Rad } P_1$, $H_u \subset (P_1)_u$ (включение для унипотентных радикалов). Пусть H^{an} — максимальная анизотропная подгруппа в H° . Поскольку мы интересуемся только H -орбитами, снабжёнными k -точками, из существования разложения Брюа $(G/P)_k = (P_u)_k sP_k/P_k \cup P_k/P_k$ следует, что достаточно рассмотреть H -орбиты в клетках PsP/P и eP/P . Имеем следующие возможности: либо $Z \cap (PsP/P) \neq \emptyset$, либо $Z_k = eP/P$.

Тип (U). Пусть H не содержит расщепимый тор. Поскольку H имеет открытую орбиту на $P_u sP/P$, то H^{an} имеет открытую орбиту для действия сопряжениями на P_u/H_u . Но это невозможно, кроме случая $H_u = P_u$, поскольку иначе по предложению 2 эта орбита также замкнута, но в то же время содержит H^{an} -неподвижную точку eH_u в своём замыкании.

Тем самым множество P -орбит на G/H , обладающих k -точками, состоит из двух орбит точек sH и eH (k -ранг этих орбит одинаков).

Тип (S). Пусть H содержит нецентральный расщепимый тор. Предположим, что $H^\circ \supset S$ и $P_u \neq H_u$. Если $Z_k = eP/P$, то Z состоит из множества H -неподвижных точек, а значит, Z содержится в неприводимой компоненте $(G/P)^S$, которая является изолированной S -неподвижной точкой eP/P . Пусть открытое в Z подмножество $Z \cap PsP/P$ непусто. Как и ранее, действие H сводится к действию H^{e1} на P_u/H_u сопряжениями. Заметим, что действия H^{e1} и S коммутируют, а S действует со строго положительными весами на $\mathfrak{p}_u/\mathfrak{h}_u$. Таким образом, S стягивает P_u/H_u к H^{e1} -неподвижной точке. Отсюда следует, что S не может сохранять H^{an} -орбиту ни одной k -точки P_u/H_u , поскольку эти орбиты замкнуты. Тем самым каждая H^{an} -орбита точки из P_u/H_u , отличной от eH_u , содержится в одномерном семействе замкнутых H^{an} -орбит. Поскольку H^{e1} имеет открытую орбиту на P_u/H_u , семейство общих замкнутых H^{an} -орбит одномерно. По предложению 7 все другие семейства замкнутых H^{an} -орбит состоят только из конечного числа орбит, но орбитой с таким свойством может быть только H^{an} -неподвижная точка eH_u .

Множество P -орбит на G/H , обладающих k -точками, состоит из трёх орбит: открытой и двух орбит PeH и PsH меньшего ранга. В случае если расщепимый тор централен, после сопряжения на элемент из G_k можно считать, что он совпадает с S , а груп-

па H лежит в Леви L . И рассуждения полностью аналогичны проведённым выше.

Действия редуктивных подгрупп на многообразии флагов полупростой группы расщепимого ранга 1 обладают интересным свойством, которое мы назовём сильной k -стабильностью. Напомним хорошо известные результаты.

Предложение 5 [11]. Пусть $H \subset G$ — редуктивная группа, действующая на многообразии флагов G/P . Тогда компонента связности редуктивной группы $Z_G(H)$ действует транзитивно на неприводимых компонентах множества неподвижных точек $(G/P)^H$.

Приведём критерий стабильности В.Л. Попова [12] для алгебраически незамкнутых полей.

Теорема 3. Пусть G — связная редуктивная группа над k с тривиальной группой k -характеров. И пусть X — аффинное нормальное абсолютно неприводимое G -многообразие над k , с группой классов k -дивизоров Вейля, состоящей из элементов конечного порядка. Пусть стабилизатор общей (над K) G -орбиты на X редуктивен, тогда действие стабильно.

Обозначим через P' максимальную квазианизотропную подгруппу в P (равную $L^{\text{an}} P_u$).

Следствие 1. Пусть H — k -подгруппа в простой группе G расщепимого ранга 1 и пусть H не имеет k -характеров. Тогда действие H на G/P' стабильно.

Предложение 6. Пусть H_x — анизотропный стабилизатор некоторой точки из $(G/P)_k$. Тогда H -орбиты точек общего положения из множества $(G/P')^{H_x}$ замкнуты.

Доказательство. Пусть H_x — анизотропна. Обозначим через $(G/P')^{H_x} \cup \{0\}$ аффинный конус над $(G/P)^{H_x}$. Более того, H_x равно пересечению H и некоторой подгруппы, сопряжённой P , и тем самым P_k -сопряжением можно добиться (для полей характеристики 0), что группа H_x содержится в анизотропной части L (обозначаемой L^{an}). В частности, централизатор $Z_G(H_x)$ является редуктивным и содержит k -расщепимый тор ранга 1.

Итак, компонента связности множества неподвижных точек $(G/P)^{H_x}$ состоит в точности из единственной полной $Z_G(H_x)^0$ -орбиты, которая является либо точкой, либо обобщённым многообразием флагов для группы ранга 1. Если $Z_H(H_x)$ не содержит расщепимый центральный тор, то действие $Z_H(H_x)$ на аффинном конусе над этим флаговым многообразием стабильно.

Если $Z_H(H_x)$ содержит центральный расщепимый подтор, то $Z_H(H_x) \subset L$. Рассмотрим ограничение

действия L на подмножество Y^0 (его аффинный конус \hat{Y}^0), полученное пересечением открытой клетки на G/P и её сопряжённой с помощью s . Заметим, что любой вектор из \hat{Y}^0 содержит старший и младший S -вес. В частности, любая S -орбита из этого подмножества замкнута. Поскольку орбиты анизотропной группы также замкнуты, легко видеть, что $Z_H(H_x)$ -орбиты из \hat{Y}^0 также замкнуты.

По критерию Луны $Z_H(H_x)$ -орбита точки $y \in (G/P')^{H_x}$ замкнута $\overline{G/P'} \cup \{0\}$, если и только если орбита H_y замкнута в $\overline{G/P'} \cup \{0\}$, что доказывает предложение.

Определение 4. Назовём замкнутое H -подмногообразие $Y \subset X$ максимальным k -листом, если оно не содержится в большем k -плотном подмножестве, для которого размерность орбиты общего положения равна размерности орбиты общего положения в Y .

Следствие 2. Пусть \tilde{Y} — аффинный конус над k -плотным H -многообразием $Y \subset G/P$, не содержащимся ни в каком большем k -плотном подмножестве, для которого размерность орбиты общего положения равна размерности орбиты общего положения в Y . Тогда \tilde{Y} является стабильным.

Следующее предложение легко следует из существования категорного фактора.

Предложение 7. Пусть $X \supset Y$ — аффинные H -многообразия со стабильным действием. Тогда $c_H(Y) < c_H(X)$, если Y неплотно в X .

Заметим, что дополнение к H -орбите старшего вектора в G/P разлагается в конечное объединение G -многообразий в соответствии с типом класса сопряжённости редуктивного стабилизатора в H . По предложению 6 для каждого аффинного конуса \hat{Y} над максимальным k -листом Y имеем $c_H(\hat{Y}) < c_H(G/P')$, а поскольку $c_H(\hat{Y}) = c_H(Y) + 1$ (стабилизатор поднимается до стабилизатора вектора, будучи анизотропным), получаем $c_H(Y) < c_H(G/P)$.

Следствие 3. Для k -плотного H -многообразия $Y \subset G/P$ выполняется равенство $c_H(Y) = c_H(G/P')$, если и только если Y является орбитой старшего вектора и $c_H(G/P) = 0$.

Наметим основную идею доказательства теоремы 1 в случае локально-компактных полей. Для этого рассмотрим два рациональных фактора $\pi_Q: QY \rightarrow QY \cdot Q$ и $Y \rightarrow Y \cdot P$. Для общей точки $y \in Y$ слой ограничения отображения π_Q на Y равен $Qy \cap Y$. Переходя к гладким открытым P -инвариантным k -подмножествам Y_0 в Y , мы можем считать, что

P -орбиты в Y_0 имеют одинаковую размерность, а слои $\pi_Q|_Y$, т.е. $QY \cap Y_0$ гладки (возможно, приводимы). Из k -плотности Y следует, что u можно взять из $Y_k \cap Y_0$. Положим $Z := QY \cap Y_0$, тогда имеем

Предложение 8. *Для локально компактного поля k многообразия Z является гладким k -плотным и $c_P(QY) \geq c_P(Z)$.*

Включение $Y \subset QY$ индуцирует отображение $Y \cdot P \rightarrow QY \cdot Q$, при этом слой, содержащий образ u , соответствует общим P -орбитам в $QY \cap Y$. Откуда

$$\begin{aligned} c_P(QY) &= c_P(QY) + \dim QY \cdot Q, \\ c_P(Y) &= c_P(QY \cap Y) + \dim QY \cdot Q. \end{aligned}$$

По предложению 8 $c_P(QY) \geq c_P(Y)$.

Таким образом, теорема 1 следует из следующего утверждения.

Предложение 9. *Пусть G — полупростая группа расщепимого полупростого ранга 1, а H — её k -подгруппа. Тогда для H -инвариантного k -плотного подмногообразия Z имеем $c_H(G/P) \geq c_H(Z)$.*

Доказательство предложения в случае, когда H имеет редуктивный полупростой k -ранг один, сводится к следствию 3, а в случае, когда радикал H нетривиален, использует идеи из случаев (U) и (S), разобранных выше.

Источник финансирования. Работа В.С. Жгуна финансировалась в рамках проекта “Исследование групповых алгебраических многообразий и их связей с алгеброй, геометрией и теорией чисел” (№ 0065–2018–0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винберг Э.Б. Сложность действий редуктивных групп // Функцион. анализ и его прил. 1986. Т. 20. № 1. С. 1–13.
2. Borel A., Tits J. Groupes Reductifs // Inst. Hautes Etudes Sci. Publ. Math. 1965. V. 27. P. 55–150.
3. Springer T.A. Linear Algebraic Groups. B.: Springer Science / Business Media, 2010.
4. Kempf G. Instability in Invariant Theory // Ann. Math. 1978. V. 108. № 2. P. 299–316.
5. Knop F., Krötz B. Reductive Group Actions. 2016. arXiv preprint arXiv:1604.01005
6. Serre J.P. Galois Cohomology. B.: Springer Science / Business Media, 2013.
7. Humphreys J.E. Linear Algebraic Groups. Graduate Texts in Math. N.Y.; Heidelberg; B.: Springer-Verlag, 1975. № 21.
8. Платонов В.П. Доказательство гипотезы конечности для разрешимых подгрупп алгебраических групп // Сиб. мат. журн. 1969. Т. 10. С. 1084–1090.
9. Borel A., Tits J. Éléments Unipotents et Sous-Groupes Paraboliques de Groupes Réductifs. I // J. Invent. Math. 1971. V. 12. № 2. P. 95–104.
10. Вейсфейлер Б.Ю. Об одном классе унипотентных подгрупп полупростых алгебраических групп // УМН. 1966. Т. 21. № 2 (128). С. 222–223.
11. Richardson R.W. On Orbits of Algebraic Groups and Lie Groups // Bull. Austral. Math. Soc. 1982. V. 25. № 1. P. 1–28.
12. Попов В.Л. On the Stability of the Action of an Algebraic Group on an Algebraic Variety // Math. USSR-Izv. 1972. V. 6. № 2. P. 367–379.
13. Платонов В.П., Рапичук А.С. Алгебраические группы и теория чисел. М.: Наука, 1991. 656 с.
14. Винберг Э.Б., Попов В.Л. Теория инвариантов. Алгебраическая геометрия-4. Итоги науки и техн. Сер. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 55. С. 137–309.
15. Krötz B., Schlichtkrull H. // J. Eur. Math. Soc. 2016. V. 18. № 6. P. 1391–1403.

ON COMPLEXITY OF REDUCTIVE GROUP ACTIONS OVER ALGEBRAICALLY NON-CLOSED FIELD AND STRONG STABILITY OF THE ACTIONS ON FLAG VARIETIES

V. S. Zhgoon, F. Knop

Presented by Academician of the RAS V.P. Platonov October 10, 2018

Received September 3, 2018

We announce the results generalizing the Vinberg’s Complexity Theorem for the action of reductive group on an algebraic variety over algebraically non-closed field. Also we give new results on the strong k -stability for the actions on flag varieties.

Keywords: reductive algebraic groups, complexity of the actions over algebraically non-closed fields, orbits of minimal parabolic subgroup, stability of the action, Bruhat decomposition.

УДК 621.3.029.6

ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ НА ДВУМЕРНОМ МИКРОПОЛОСКОВОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛЕ

Б. А. Беляев^{1,2,*}, С. А. Ходенков³, Р. Г. Галеев³,
академик РАН В. Ф. Шабанов^{1,3}

Поступило 19.10.2018 г.

На основе двумерного электромагнитного микрополоскового кристалла разработана новая конструкция фильтра нижних частот, которая обладает более высокой крутизной склона амплитудно-частотной характеристики по сравнению с фильтром на одномерном электромагнитном микрополосковом кристалле. Исследованная конструкция фильтра нижних частот отличается высокой технологичностью и простотой в изготовлении. Численный электродинамический расчёт 3D-модели рассмотренной микрополосковой структуры хорошо согласуется с экспериментом, что позволяет проводить параметрический синтез устройств с заданными характеристиками на персональном компьютере.

Ключевые слова: фильтр нижних частот, электромагнитный кристалл, микрополосковое устройство.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485127-32>

Как известно, частотно-селективные устройства сверхвысоких частот (СВЧ) и, в частности, фильтры являются важнейшими элементами в системах связи, радиолокации, радионавигации, а также в различной измерительной и специальной радиоаппаратуре [1, 2]. К самым востребованным типам фильтров относятся полосно-пропускающие, однако во многих случаях для оптимального решения радиотехнических задач требуются фильтры нижних частот (ФНЧ), которые почти без потерь пропускают электромагнитные волны в полосе частот от нуля до заданной частоты среза, обеспечивая заграждение от помех в высоко-частотной области. Хорошо также известно, что характеристики фильтров и их размеры зачастую определяют качество и габариты СВЧ-устройств. Поэтому разработка новых миниатюрных конструкций ФНЧ, обладающих высокой избирательностью, малыми потерями в полосе пропускания, технологичностью в изготовлении и низкой стоимостью в производстве, — важная и актуальная задача.

В настоящее время в технике СВЧ широко используются миниатюрные конструкции ФНЧ, изготовленные в виде монолитной структуры по технологии многослойных интегральных схем на основе керамик с низкой температурой отжига LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) [3]. В таких фильтрах

основой являются резонансные структуры, состоящие из квазисосредоточенных ёмкостных и индуктивных элементов [4], имеющих сравнительно низкую собственную добротность, что отражается на невысоких параметрах амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) таких устройств.

Конструкции ФНЧ на микрополосковых резонаторах больше по размерам, но они проще в изготовлении, а главное, они могут иметь значительно лучшие характеристики. Именно поэтому в последние годы активно разрабатываются и исследуются новые конструкции ФНЧ в микрополосковом исполнении [5–8]. Для улучшения характеристик в них, как правило, используется большой набор различных резонаторов, часть из которых формирует полосу пропускания, а другая часть формирует полюса затухания, позволяющие увеличить крутизну склона АЧХ и расширить полосу заграждения. С этой же целью исследователи изготавливают щелевые резонаторы в экране микрополосковых конструкций [9].

В настоящей работе приведены результаты исследования новой конструкции ФНЧ, разработанной на основе двумерного микрополоскового электромагнитного кристалла, которая отличается от известных конструкций высокой крутизной склона АЧХ.

КОНСТРУКЦИЯ ДВУМЕРНОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛА

Как известно, одномерные микрополосковые электромагнитные кристаллы, которые нередко на-

¹Институт физики им. Л. В. Киренского
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Красноярск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

³Сибирский государственный университет
науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, Красноярск

*E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

зывают аналогами фотонных кристаллов, представляют собой цепочку чередующихся резонаторов, образованных отрезками линий передачи с низким и высоким волновым сопротивлением. Как правило, отрезки микрополосковых линий, изготовленные на монолитной диэлектрической подложке, различаются шириной полосковых проводников, образуя нерегулярную периодическую структуру. На таких микрополосковых структурах разрабатывают полотно-пропускающие фильтры [10, 11], а также ФНЧ [12]. Однако частотно-селективные свойства устройств на одномерных электромагнитных кристаллах сравнительно невысоки из-за малой крутизны склонов АЧХ, которую можно увеличить только наращиванием числа резонаторов в структуре. Очевидно, при этом увеличиваются размеры конструкции. Названная проблема успешно решается при построении ФНЧ с использованием двумерного микрополоскового электромагнитного кристалла (рис. 1), в котором реализуется дополнительная электромагнитная связь между несмежными резонаторами. Такая перекрёстная связь, как известно, позволяет существенно увеличивать крутизну склонов АЧХ [13].

Конструкция фильтра представляет собой свёрнутую в три ряда цепочку микрополосковых резонаторов с непосредственной (гальванической) связью, отличающихся шириной w_i и длиной l_i полосковых проводников резонаторов (i — номер резонатора). Концы полосковых проводников крайних резонаторов такой конструкции подключены к входному и выходному портам со стандартным волновым сопротивлением 50 Ом, что определяет симметрию конструкции. Подложка микрополосковой структуры имеет относительную диэлектрическую проницаемость ϵ и толщину d . Важно отметить, что материал диэлектрической подложки должен обладать достаточно высокой добротностью, чтобы не вносить дополнительных потерь СВЧ-мощности в полосу пропускания фильтра, которые в микрополосковых конструкциях обусловлены главным образом омическими потерями в проводниках.

Параметрический синтез конструкции ФНЧ проводили численным электродинамическим анализом 3D-модели рассматриваемой структуры с помощью программы AWR Microwave-Office путём подбора конструктивных параметров w_i и l_i . Как видно на рис. 1, длина резонатора под номером 9 задаёт расстояние между параллельными цепочками резонаторов. Для определённости в качестве материала подложки микрополосковой структуры, имеющей толщину 1 мм, выбран традиционный в СВЧ-тех-

натуров с непосредственной (гальванической) связью, отличающихся шириной w_i и длиной l_i полосковых проводников резонаторов (i — номер резонатора). Концы полосковых проводников крайних резонаторов такой конструкции подключены к входному и выходному портам со стандартным волновым сопротивлением 50 Ом, что определяет симметрию конструкции. Подложка микрополосковой структуры имеет относительную диэлектрическую проницаемость ϵ и толщину d . Важно отметить, что материал диэлектрической подложки должен обладать достаточно высокой добротностью, чтобы не вносить дополнительных потерь СВЧ-мощности в полосу пропускания фильтра, которые в микрополосковых конструкциях обусловлены главным образом омическими потерями в проводниках.

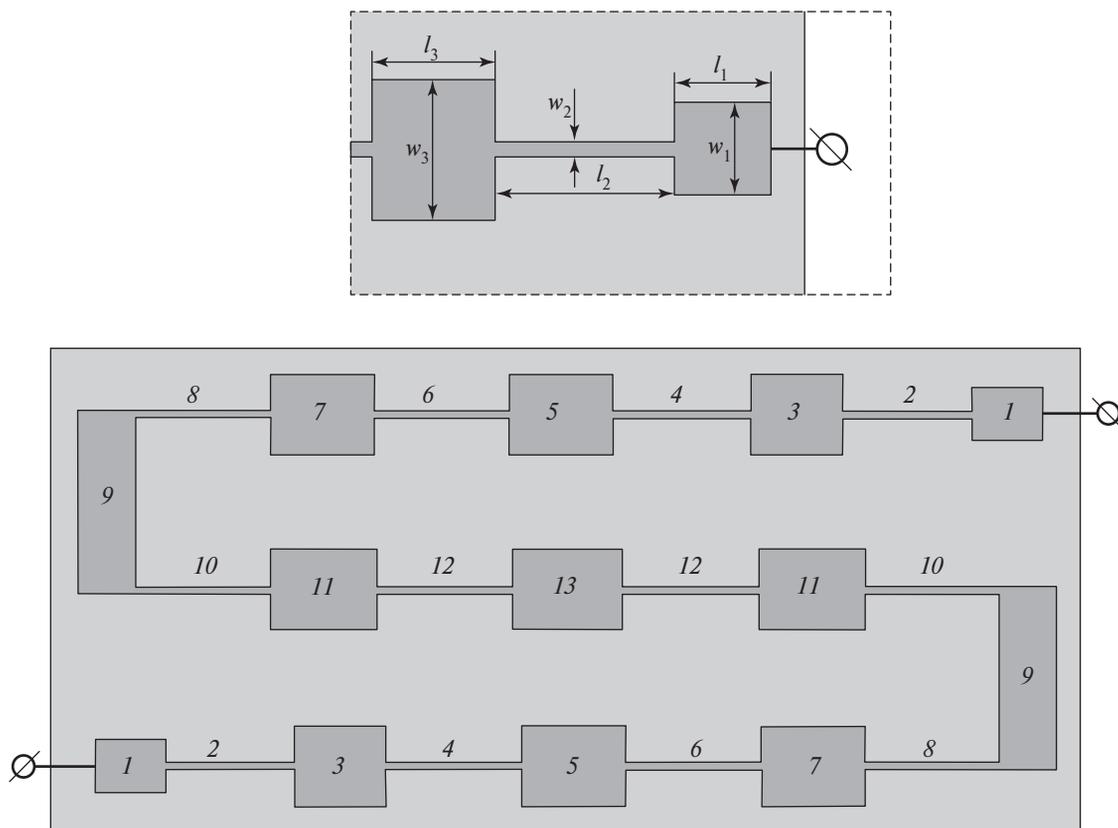


Рис. 1. Конструкция фильтра нижних частот на микрополосковом двумерном электромагнитном кристалле.

Таблица 1. Размеры топологии полосковых проводников фильтра нижних частот на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле

Номер резонатора i	Длина проводника l_i , мм	Ширина проводника w_i , мм
1	4,20	3,21
2	8,01	0,40
3	5,40	4,39
4	8,60	0,40
5	6,01	4,41
6	9,10	0,39
7	6,10	4,41
8	6,40	0,20
9	9,21	3,00
10	6,40	0,20
11	6,19	4,40
12	9,15	0,40
13	6,09	4,40

нике керамический материал — поликор ($\epsilon = 9,8$). Отметим, что единственное ограничение при синтезе исследуемой конструкции накладывалось на длину микрополосковой структуры, что обусловлено максимальным стандартным размером поликоровых подложек — 60 мм. Поэтому с учётом необходимых отступов наружных границ рисунка проводников от краёв подложки, которые должны быть не менее её толщины, длина микрополосковой структуры не может превышать 58 мм.

По конструктивным параметрам, полученным в результате параметрического синтеза устройства, был изготовлен опытный образец ФНЧ, представленный на фотографии (рис. 2). Размеры подложки фильтра $60,0 \times 24,4$ мм, а размеры отрезков полосковых линий, образующих резонаторы в его нерегулярной микрополосковой структуре, приведены в табл. 1 в соответствии с обозначениями на рис. 1. Точками на рис. 2 представлены измеренные АЧХ

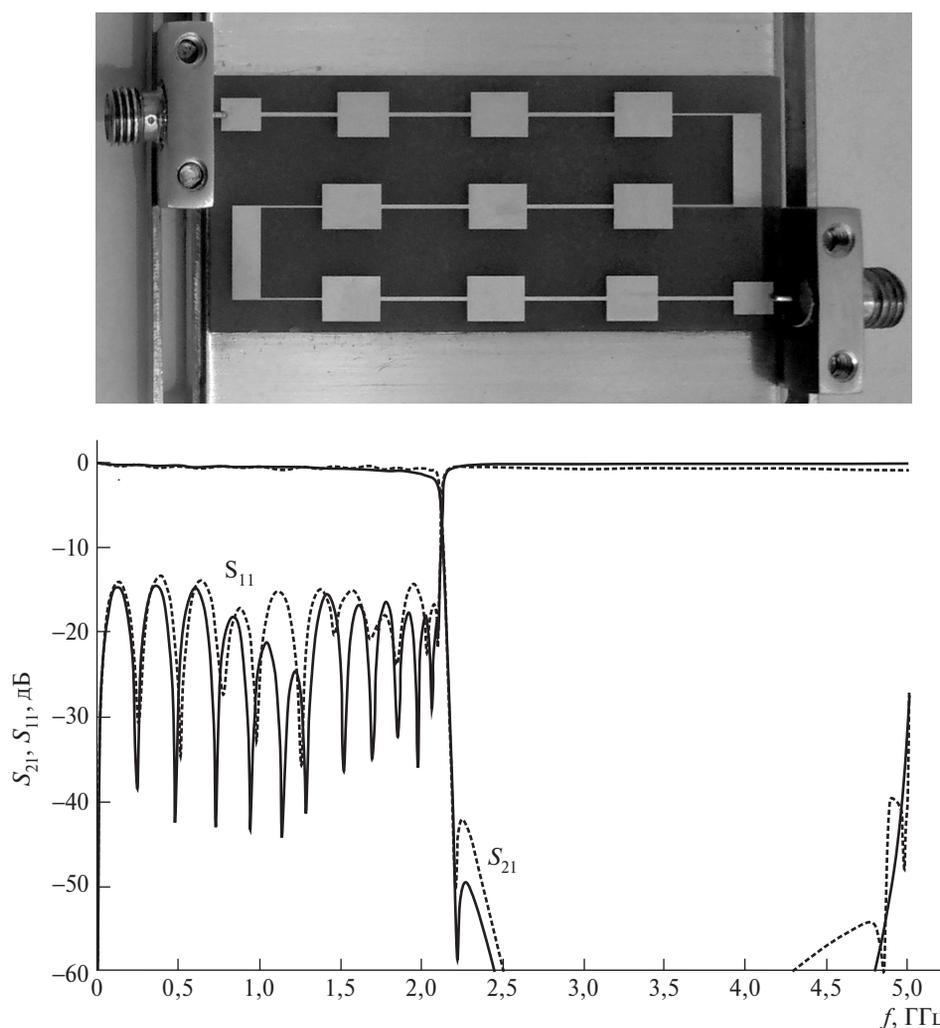


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтра нижних частот на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле. Точки — измерения, линии — расчёт. Вверху фотография опытного образца фильтра.

прямых потерь S_{21} и потерь на отражение S_{11} , а сплошными линиями показаны АЧХ, полученные численным анализом 3D-модели разработанной конструкции ФНЧ. Заметим, что для объективности сравнения при электродинамическом расчёте представленной на рисунке АЧХ в 3D-модель подставлялись реальные размеры конструкции фильтра, измеренные после его изготовления.

Зависимости на рис. 2 показывают, во-первых, достаточно хорошее согласие измеренных характеристик ФНЧ с рассчитанными, а во-вторых, очень высокую крутизну склона АЧХ, обусловленную полюсом затухания, расположенным вблизи полосы пропускания. Отметим, что частота среза фильтра $f_3 = 2,11$ ГГц, измеренная по уровню 3 дБ от уровня минимальных потерь, составляющих величину всего лишь 0,2 дБ. При этом уже на частоте 2,18 ГГц, т.е. при отстройке от частоты среза всего на 0,07 ГГц, фильтр обеспечивает загораживание более 40 дБ. Важно отметить, что фильтр на одномерном микрополосковом электромагнитном кристалле, имеющий такое же количество резонаторов и ту же частоту среза, обеспечивает загораживание на частоте 2,18 ГГц примерно на 10 дБ меньше, что обусловлено отсутствием полюсов затухания на АЧХ такого фильтра.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРА НИЗКИХ ЧАСТОТ

Отметим, что высокие частотно-селективные свойства ФНЧ, разработанного на основе двумерного электромагнитного микрополоскового кристалла, а также технологичность и простота его изготовления доказывают перспективность применения фильтра в радиотехнических системах. В связи с этим представляет большой интерес исследовать возможность повышения частоты среза предлагаемой конструкции ФНЧ, а также возможность её реализации на подложках с более высокой относительной диэлектрической проницаемостью, что, очевидно, позволит уменьшать габариты устройства. Учитывая достаточно хорошее согласие электродинамического расчёта ФНЧ с экспериментом, исследование разработанной конструкции проведём численным анализом её 3D-модели.

Результаты проведённых таким образом исследований представлены на рис. 3, где показаны АЧХ синтезированных фильтров с частотой среза (ГГц): 2 (а); 3 (б); 4 (в). Эти фильтры выполнены на подложке из поликора толщиной 1 мм и имеют размеры подложек $57,7 \times 32,6$; $38,7 \times 25,8$ и $29,85 \times 19,4$ мм² соответственно. Сравнить частотно-селективные

свойства этих устройств удобно по крутизне склона АЧХ [14], которая вычисляется по формуле

$$k = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_{30} - \Delta f_3}, \quad (1)$$

где Δf_3 — ширина полосы пропускания фильтра по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь; Δf_{30} — ширина полосы пропускания по уровню -30 дБ, измеренная также от уровня минимальных потерь.

Для исследованных фильтров с частотами среза 2, 3 и 4 ГГц коэффициенты k равны соответственно 24; 26 и 28, т.е. с увеличением частоты среза разработанного ФНЧ крутизна склона его АЧХ монотонно растёт. На рис. 3г представлена АЧХ фильтра на подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 20$, имеющей толщину $d = 1$ мм. Фильтр имеет частоту среза 2 ГГц, а крутизна склона его АЧХ $k = 22$. При этом размеры подложки такого ФНЧ $54,1 \times 22,9$ мм, т.е. её площадь примерно в 1,5 раза меньше аналогичного фильтра на подложке из поликора ($\epsilon = 9,8$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная на основе двумерного электромагнитного микрополоскового кристалла конструкция ФНЧ обладает более высокой крутизной склона АЧХ по сравнению с ФНЧ на одномерном электромагнитном микрополосковом кристалле, что обусловлено полюсом затухания, существующим на краю полосы пропускания в двумерном кристалле. На частоте полюса затухания происходит взаимная компенсация двух электромагнитных волн, одна из которых проходит со входа на выход устройства по всей последовательной цепочке трёх рядов резонаторов, а вторая проходит со входа на выход благодаря существующей электромагнитной связи между рядами резонаторов. Очевидно, что эти волны на частоте полюса затухания имеют одинаковые амплитуды, но противоположные фазы. Важно отметить, что при уменьшении зазора между рядами резонаторов полюс затухания приближается к полосе пропускания, а при увеличении зазора — наоборот.

Исследованная конструкция ФНЧ отличается высокой технологичностью и простотой в изготовлении. При этом численный электродинамический расчёт 3D-модели рассмотренной микрополосковой структуры достаточно хорошо согласуется с экспериментом, что позволяет на персональном компьютере проводить параметрический синтез устройств с заданными характеристиками. Результаты дока-

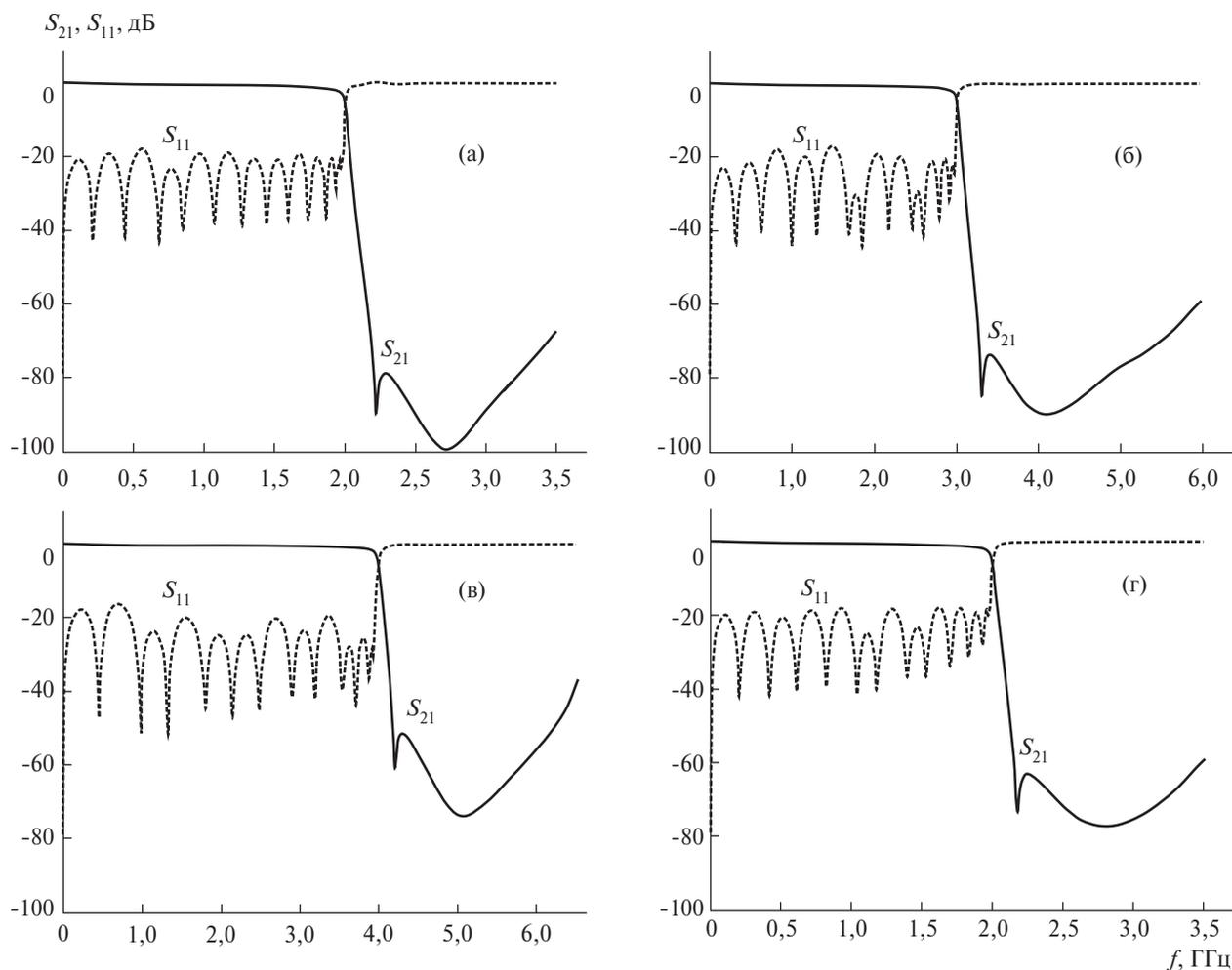


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле. Фильтры на подложках из поликора ($\epsilon = 9,8$) с частотой отсечки 2 (а), 3 (б), 4 ГГц (в) и фильтр на подложке В-20 ($\epsilon = 20$) с частотой отсечки 2 ГГц (г).

зывают перспективность использования разработанной конструкции ФНЧ в системах связи, радиолокации, в измерительной и специальной радиотехнической аппаратуре.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № RFMEFI60417X0179.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morgan M.A.* Reflectionless Filters. In: Artech House Microwave Library. Boston; L., 2017. 258 p.
2. *Hunter I.C.* Theory and Design of Microwave Filters. IET Electromagnetic Waves Series. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. V. 48. 353 p.
3. *Кондратюк Р.* LTCC — низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Наноиндустрия. 2011. № 2. С. 26–30.
4. *Hong J.-S.* Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. Hoboken: Wiley, 2011.

5. *Li K., Zhao M., Fan Yo., Zhu Z., Cui W.* With Parallel Open-Ended Stubusing Novel Double-Folded SCMRC Structurecompact Lowpass Filter with Wide Stopband // Progress in Electromagn. Res. Lett. 2013. V. 36. P. 77–86.
6. *Hayati M., Shama F.* A Compact Lowpass Filter with Ultra Wide Stopband Using Stepped Impedance Resonator // Radioengineering. 2017. V. 26. № 1. P. 269–274.
7. *Kumarand D., De A.* Compact Ultra Wide Band Filter Using Triangular Patch Resonators // Radioelectronics and Communs Syst. 2015. V. 58. № 4. P. 151–156.
8. *Hayati M., Asadbeigi H., Sheikhi A.* Microstrip Lowpass Ffilter with High and Wide Rejection Band // Electronics Lett. 2012. V. 48. № 19. P. 1217–1219.
9. *Jiang S., Xu J.* Compact Microstrip Lowpass Filter with Ultra-Wide Stopband Based on Dual-Plane Structure // Electronics Lett. 2017. V. 53. № 9. P. 607–609.
10. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых моделей полосно-про-

- пускающих фильтров на сверхрешётках // ДАН. 2004. Т. 395. № 6. С. 756–760.
11. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // РЭ. 2006. Т. 51. № 6. С. 694–701.
 12. *Hashim M.N.B., Razalli M.S., Ibrahim S.Z., Farid F.* Compact Ultra-Wideband Stepped-Impedance Low Pass Filter Utilizing Open Circuit Stub Resonator // ARPN J. Eng. and Appl. Sci. 2015. V. 10. № 19. P. 9120–9126.
 13. *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Y.F., Tyurnev V.V., Leksikov A.A., Galeev R.G.* Implementations of Cross Couplings in Microwave Bandpass Filters // Microwave and Optical Technol. Lett. 2014. V. 56. № 9. P. 2021–2025.
 14. *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В.* Частотно-селективные свойства многозвенных фильтров на регулярных микрополосковых резонаторах // РЭ. 2004. Т. 49. № 11. С. 1315–1324.

A LOWPASS FILTER BASED ON A 2D MICROSTRIP ELECTROMAGNETIC CRYSTAL

**B. A. Belyaev, S. A. Khodenkov, R. G. Galeev,
Academician of the RAS V. F. Shabanov**

Received October 19, 2018

A new construction of a lowpass filter was developed based on a two-dimensional microstrip electromagnetic crystal, which had a steeper slope of the frequency response as compared to a filter consisting of a one-dimensional microstrip electromagnetic crystal. The investigated lowpass filter construction is characterized by a high workability and ease of manufacturing. Electrodynamical numerical simulation of the 3D model of the considered microstrip structure agrees well with the experiment, which allows conducting parametric synthesis of devices with the required properties using a personal computer.

Keywords: lowpass filter, electromagnetic crystal, microstrip device.

УДК 523.165

ВАРИАЦИИ СКОРОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ХОНДРИТАХ С ИЗВЕСТНЫМИ ОРБИТАМИ

Г. К. Устинова*, В. А. Алексеев

Представлено академиком РАН М.Я. Маровым 10.10.2018 г.

Поступило 24.10.2018 г.

Представлены результаты многолетних исследований скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль орбит 42 хондритов, последовательно выпадавших на землю в 1959–2016 гг. Анализ содержания ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами позволяет выстроить пространственный профиль средней за миллион лет интенсивности галактических космических лучей ($E > 100$ МэВ) на 2–4 а.е. от Солнца, свидетельствующий о постоянном возникновении и диссипации в этой области слоя магнитных неоднородностей солнечного ветра, эффективно модулирующего галактические космические лучи. Это говорит о постоянстве магнитогидродинамической обстановки в Солнечной системе, по крайней мере в течение последнего миллиона лет.

Ключевые слова: внутренняя гелиосфера, магнитогидродинамические процессы, солнечная модуляция, галактические космические лучи, космогенные радионуклиды, метеориты.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485133-37>

Исследование космогенных радионуклидов в постоянно выпадающих на Землю каменных метеоритах (хондритах) открывает новые уникальные возможности по изучению процессов в межпланетном пространстве и закономерностей пространственных и временных вариаций распределения космической радиации в трёхмерной гелиосфере, обусловленных солнечной активностью. Дело в том, что содержания космогенных радионуклидов прямо пропорциональны интенсивности космических лучей при полёте хондритов в межпланетном пространстве, и эти нуклиды являются, таким образом, естественными детекторами космических лучей на разных расстояниях от Солнца и в разные периоды времени в зависимости от времени падения хондрита и протяжённости его орбиты [1–3]. Уникальность исследований обусловлена тем, что измерению доступны содержания космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада $T_{1/2}$ от нескольких дней (или даже часов, в зависимости от быстроты доставки хондрита в лабораторию) до миллионов лет. Очевидно, что существенным фактором эффективности этих исследований является достаточно хорошо налаженная в последние годы сеть наблюдений и регистрации падающих болидов, что позволяет точно рассчитывать сфотографированные орбиты метеоритов. К настоящему времени насчитывается уже

26 хондритов с известными орбитами, начиная с Pribram (1959 г.) и Lost City (1970 г.) [4].

Движение метеоритов, как и других космических тел, подчиняется законам Кеплера, так что их орбиты в координатах $r(t)$ описываются уравнениями Кеплера (см., например, [5])

$$\begin{aligned} r &= a(1 - e \cos E), \\ t &= \frac{T}{2\pi}(E - e \sin E), \end{aligned} \quad (1)$$

где a — большая полуось, e — эксцентриситет, E — эксцентрическая аномалия, T — орбитальный период. При $t = 0$ $r = q$, т.е. перигелию, а при $t = T/4$ $r = \tilde{r}_0$, т.е. среднему гелиоцентрическому расстоянию \tilde{r}_0 метеоритной орбиты, на котором накапливаются, например, долгоживущие космогенные радионуклиды с периодом полураспада $T_{1/2} \gg T$.

В космических телах космогенные радионуклиды образуются галактическими (ГКЛ) и солнечными (СКЛ) космическими лучами, но в метеоритах из-за их абляции при прохождении земной атмосферы сохраняются лишь эффекты облучения ГКЛ с энергией > 100 МэВ. Наблюдаемые в лунных образцах эффекты СКЛ с энергией > 20 МэВ проявляются лишь в слоях < 2 см от поверхности, которые в метеоритах теряются при абляции [1, 15]. Согласно наблюдениям в земной атмосфере (т.е. на 1 а.е.) [6] пренебрежимо малый глобальный эффект дают и протоны с $E > 100$ МэВ, которые генерируются в самых мощных (но локальных по времени) сол-

*Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва
E-mail: ustinova@dubna.net.ru; AVAL37@mail.ru

нечных вспышках, что дополнительно уменьшается в метеоритах пропорционально $\sim \tilde{r}_0^2$.

В условиях изотропного облучения хондритов ГКЛ в межпланетном пространстве измеряемые на момент падения радионуклиды с $T_{1/2} \leq T$ накапливаются на последнем участке орбиты хондритов перед их падением на Землю в течение $\sim 1,5 T_{1/2}$ радионуклидов, что естественно сопоставлять со средним гелиоцентрическим расстоянием \tilde{r}_0 хондритов в эти промежутки времени. Сравнение измеренных содержаний $H_{\tilde{r}_0}$ радионуклидов с их рассчитанными содержаниями H_{\oplus} в идентичных хондритах при интенсивности ГКЛ на 1 а.е. (по имеющимся данным стратосферных измерений [7]) позволяет определить радиальный градиент скоростей образования космогенных радионуклидов $\left(G_{\tilde{r}_0} = \frac{H_{\tilde{r}_0}/H_{\oplus} - 1}{\tilde{r}_0 - 1} \cdot 100\% \right.$

на 1 а.е.) и, таким образом, оценить интенсивность ГКЛ на разных гелиоцентрических расстояниях в разные периоды времени, что пока недоступно прямым измерениям в межпланетном пространстве в тех объёмах, которые могут предоставить постоянно выпадающие хондриты.

Навстречу ГКЛ, изотропно поступающим в гелиосферу из космического пространства, Солнце излучает солнечный ветер (протоны и электроны с $E < 10$ эВ) и солнечные космические лучи (СКЛ), в основном солнечные протоны с $E > 10$ МэВ, которые, ослабляясь пропорционально квадрату расстояния, распространяются вплоть до динамической границы равновесия с межзвёздным газом на расстояниях ≥ 100 а.е. Это приводит к постепенному уменьшению интенсивности поступающих ГКЛ, их модуляции общим объёмом солнечного ветра, для которой характерны малые $\sim 2-4$ %/а.е. градиенты ГКЛ. Именно такие градиенты были измерены в полётах КК Маринер-4, -5 в 1964–1965 гг., Пионер-10, -11 в 1972–1976 гг. и Вояджер-1, -2 в 1984–1986 гг. [7–9], что свидетельствует о непрерывном, равномерном росте интенсивности ГКЛ с удалением от Земли вплоть до её выравнивания с интенсивностью ГКЛ в космическом пространстве на границе гелиосферы.

Однако такая постоянная равномерность не согласуется с динамическими процессами и конфигурациями магнитных полей в гелиосфере. В соответствии с 11-летними вариациями солнечной активности солнечный ветер и СКЛ периодически с разной интенсивностью и скоростью испускаются Солнцем навстречу ГКЛ. Сначала их движение радиально, но из-за вращения Солнца их пути по-

степенно искривляются, закручиваясь по спирали Архимеда, и примерно на ~ 5 а.е. становятся практически азимутальными [10]. Вмороженные в плазму магнитные поля солнечного ветра, закручиваясь, создают труднопреодолимые барьеры для проникновения ГКЛ к Солнцу, т.е. практически выметают их из гелиосферы. Чем выше солнечная активность, тем ниже интенсивность ГКЛ у Земли. Таким образом, кроме модуляции ГКЛ, обусловленной полным объёмом солнечного ветра, в годы высокой солнечной активности ввиду худших условий диффузии ГКЛ в азимутальных полях, чем в радиальных, на 2–5 а.е. от Солнца периодически возникает более эффективная модуляция ГКЛ, в частности с более высокими градиентами ГКЛ в этой области, которая является, по-видимому, зоной взаимодействия прямых и обратных ударных волн, высокоскоростных потоков солнечного ветра и коротитирующих потоков низкоэнергичных частиц. Это характеризуется повышенной турбулентностью магнитных полей и повышенной плотностью магнитных неоднородностей, эффективно рассеивающих ГКЛ, создающих дополнительный градиент их интенсивности к малому градиенту при спокойном солнечном ветре. При спаде солнечной активности нестационарные процессы ослабевают, и такой эффективный модулирующий слой постепенно истончается и рассасывается, так что остаточная модуляция снова определяется лишь полным объёмом солнечного ветра. Следует обратить внимание, что указанные выше запуски КК Маринер, Пионер и Вояджер производились в периоды минимумов солнечной активности 19-, 20- и 21-го солнечных циклов, когда отсутствовала модуляция во внутренней гелиосфере и градиенты ГКЛ были малы. В годы же развития максимумов солнечных циклов КК были уже за пределами области эффективной модуляции и снова регистрировали лишь малые градиенты ГКЛ, обусловленные лишь общим объёмом солнечного ветра.

Между тем в области до 4–5 а.е. внутренней гелиосферы лежат орбиты метеоритов, которые могут выпасть на Землю. Уже первые исследования радионуклидов в хондритах с известными орбитами Pribram и Lost City, выпавших в фазах максимума 19- и 20-го солнечных циклов, зарегистрировали существенный рост интегральных градиентов ГКЛ ($E > 100$ МэВ) вдоль их орбит (вплоть до ~ 4 а.е.), тогда как данные о хондрите Innisfree, выпавшем в минимуме 20-го цикла, зарегистрировали малые градиенты ГКЛ, соответствующие измерениям на КК Пионер-10, -11 [10, 11]. Эти закономерности подтвердились проводимым нами последовательным

изучением космогенных радионуклидов в 42 выпавших с 1959 г. хондритах, что привело к мониторингу пространственных и временных вариаций ГКЛ в гелиосфере в течение уже 5 солнечных циклов и впервые выявило динамический характер и особенности солнечной модуляции ГКЛ на 2–4 а.е. внутренней гелиосферы (т.е. в пределах метеоритных орбит; рис. 1). Для 10 из этих хондритов орбиты точно рассчитаны [4] (рис. 1а), и найденные для скоростей образования их радионуклидов закономерности полностью соответствуют общей картине мониторинга 11-летних вариаций ГКЛ за ~60 лет, сглажен-

ных полиномиальной кривой (рис. 1б). Оценка протяжённости орбит для других хондритов на рис. 1б выполнена феноменологическим методом, разработанным и подробно описанным в [1, 12]. На рис. 1в по стратосферным данным [7] показано, что интенсивность ГКЛ у Земли антикоррелирует с солнечной активностью и величиной градиентов скоростей образования радионуклидов в хондритах. Действительно, градиенты варьируются от 0 до ~100 %/а.е. пропорционально солнечной активности, составляя в среднем за солнечный цикл 20–30 %/а.е. [1–3, 13]. Непосредственными измерениями в пределах ~5 а.е. от Солнца вариации градиентов ГКЛ в зависимости от солнечной активности были зарегистрированы только после запуска КА Улисс в максимуме 1990 г. [14].

Как проявляются эти процессы на длительной временной шкале? Вторая особенность космогенных радионуклидов, а именно существование долгоживущих радионуклидов, в частности ^{26}Al с $T_{1/2} = 0,717$ млн лет, позволяет выявить такие фундаментальные закономерности. В табл. 1 представлены измеренные на момент падения 10 хондритов с известными орбитами содержания ^{26}Al , накопленные под действием средней интенсивности ГКЛ за миллион лет на средних гелиоцентрических расстояниях их орбит. Для оценки средней за миллион лет интенсивности ГКЛ на 1 а.е. были проанализированы глубинные профили ^{26}Al в колонках лунного грунта Луны-24 (L-24) и Apollo-15 (Ap-15) [1, 15]. Показано, что они количественно воспроизводятся расчётом при использовании средней интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) $I = 0,24 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$, соответствующей средней интенсивности за современные солнечные циклы, что свидетельствует о постоянстве процессов солнечной модуляции вблизи Земли в течение последнего ~1 млн лет. Что происходит на других гелиоцентрических расстояниях? Расчёты скоростей образования ^{26}Al в идентичных хондритах на 1 а.е. с использованием средней интенсивности $I = 0,24 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ и сравнение с измеренными содержаниями ^{26}Al выявили градиенты скоростей образования этого изотопа $G_{\bar{r}}$ (%/а.е.) порядка 20–30 %/а.е. (на рис. 1а, б этот диапазон отмечен штриховыми горизонталями). Соответствующий этому градиенту рост с гелиоцентрическим расстоянием средней за миллион лет интенсивности ГКЛ представлен на рис. 2. Видно, что полиномиальная кривая через отдельные точки демонстрирует крутой рост интенсивности ГКЛ с пиком на 2–4 а.е. ввиду периодического накопления ГКЛ в этой области из-за худших условий дальнейшего проникновения

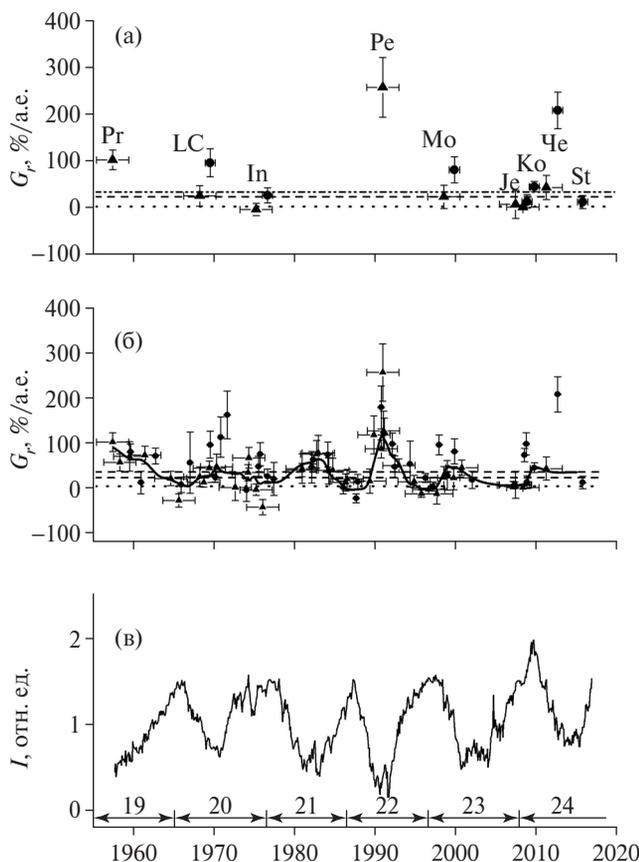


Рис. 1. а — вариации интегральных градиентов скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль метеоритных орбит (на 2–4 а.е. от Солнца) по данным о радиоактивности ^{54}Mn (кружки), ^{22}Na (треугольники) и ^{26}Al (штриховые горизонталы на 20–30 %/а.е.) в 10 хондритах с известными орбитами, выпавших в 1959–2016 гг. (см. табл. 1); б — вариации интегральных градиентов скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль метеоритных орбит в 42 хондритах, выпавших в 1959–2016 гг. (кривая — полиномиальная кривая сглаживания экспериментальных данных по пяти точкам с учётом веса каждой точки; неизвестные орбиты хондритов рассчитаны феноменологическим методом [1, 12]; обозначения, как на рис. 1а); в — вариации интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) у Земли по стратосферным данным [5].

Таблица 1. Средние за миллион лет интенсивность I (>100 МэВ) и градиенты G_r ГКЛ в гелиосфере по данным о радиоактивности ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами (см. ссылки в [1, 2, 13, 15])

№	Хондрит	a , а.е.	\tilde{r}_0^{**} , а.е.	^{26}Al , расп. · мин ⁻¹ · кг ⁻¹	G_r , %/а.е.	$I(>100 \text{ МэВ})$, см ⁻² с ⁻¹ ср ⁻¹
1	Příbram (Pr)	2,401±0,002	3,33±0,01	53±5	22±9	0,36±0,03
2	Lost City (LC)	1,66*	1,81	58±6	26±22	0,29±0,03
3	Innisfree (In)	1,87*	2,25	64±6	22±14	0,30±0,03
4	Peekskill (Pe)	1,49±0,03	1,72±0,03	71±6	36±24	0,30±0,03
5	Morávka (Mo)	1,85±0,07	1,60±0,06	57±6	31±21	0,28±0,03
6	Košice (Ko)	2,71±0,24	3,63±0,32	60±2	15±7	0,33±0,01
7	Челябинск(Че)	1,72±0,02	2,25±0,03	28±4	33±27	0,34±0,05
8	Stubenberg (St)	1,53±0,01	1,75±0,01	61±5	28±16	0,29±0,02
9	Jesenice (Je)	1,75±0,07	2,04±0,08	41±6	28±25	0,31±0,05
10	Park Forest (PF)	2,53±0,19	3,45±0,26	69±4	20±4	0,35±0,02
11	Ср. гипотетич. хондрит***	1,95±0,08	2,38±0,10	56±5	26±16	0,32±0,03
12	Луна (L-24; Ap-15)		1	Глубинный профиль		0,24±0,02

Примечание. * Ошибки не указаны. ** Средние гелиоцентрические расстояния орбит хондритов рассчитаны по уравнениям Кеплера (1) для моментов времени $t = T/4$, где $T = 365\sqrt{a^3}$ дней, если a в а.е. *** Гипотетический хондрит, орбита которого осциллирует в пределах вариаций: $a \sim 1,49-2,71$ а.е., $e \sim 0,395-0,680$ (ср. $0,517 \pm 0,013$) (афелий $Q \sim 2,10-4,50$ а.е., ср. $Q \sim 3,02$ а.е.), $\tilde{r}_0 \sim 1,60-3,63$ а.е.

к Земле. Тенденция к последующему выполаживанию интенсивности ГКЛ с удалением от Земли свидетельствует о локальности участка гелиосферы с динамическими процессами проявления солнечной модуляции, т.е. о перманентном возникновении эффективного модулирующего слоя магнитных неоднородностей на 2–4 а.е. внутренней гелиосферы в течение последнего ~1 млн лет. Это говорит о постоянстве магнитогидродинамической обстановки

в Солнечной системе, по крайней мере в течение последнего миллиона лет.

Данные табл. 1 определяют и пределы возможной неопределённости результатов по средней интенсивности ГКЛ в течение миллиона лет из-за возможной нестабильности метеоритных орбит на этой временной шкале. Действительно, представленные в табл. 1 значения средней интенсивности ГКЛ по данным 10 хондритов, большая ось которых меняется в пределах $a \sim 1,49-2,71$ а.е., а эксцентриситет $e \sim 0,395-0,680$ [4], можно рассматривать как вариации средней интенсивности ГКЛ за миллион лет при осцилляции в указанных пределах элементов орбиты гипотетического хондрита с соответствующими средними параметрами: $a = 1,95 \pm 0,08$ а.е.; $e = 0,517 \pm 0,013$; $\tilde{r}_0 = 2,38 \pm 0,10$ а.е. (и, соответственно, при осцилляции среднего значения афелия $Q \sim 3,02$ а.е. в пределах $Q \sim 2,10-4,50$ а.е.). Из табл. 1 следует, что на среднем гелиоцентрическом расстоянии такого хондрита $\tilde{r}_0 = 2,38 \pm 0,10$ а.е. (при осцилляции его афелия в широких пределах от 2,10 до 4,50 а.е.) среднее за миллион лет значение интенсивности ГКЛ составляет $I (> 100 \text{ МэВ}) = 0,32 \pm 0,03 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$, что в пределах указанных ошибок соответствует значениям по данным всех хондритов и обусловлено именно постоянством средней за миллион лет интенсивности ГКЛ в области метеоритных орбит. Из сравнения со значением $I (> 100 \text{ МэВ}) = 0,24 \pm 0,02 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ на 1 а.е. по лунным данным следует более высокий (на 20–30%) уровень интенсивности ГКЛ в области метеоритных орбит на 2–5 а.е., что позволяет рассматривать эту

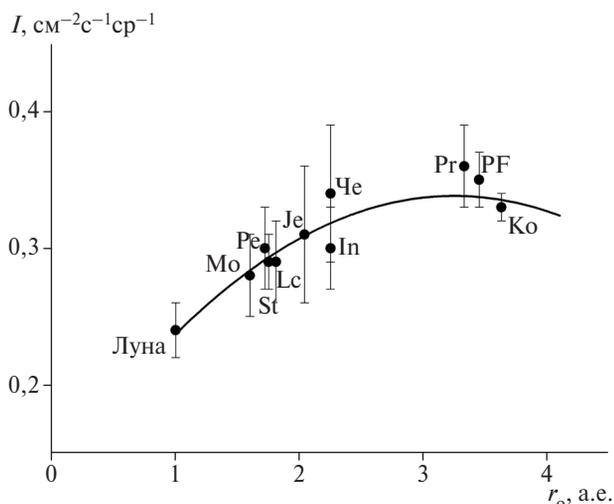


Рис. 2. Пространственное распределение средней за миллион лет интенсивности ГКЛ (> 100 МэВ) в гелиосфере по данным о содержании ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами. Значение для Земли по глубинным профилям ^{26}Al в колонках лунного грунта Luna-24 и Apollo-15 [1, 15]. Данные аппроксимированы полиномом второй степени с учётом ошибок измерений.

область как область эффективной модуляции ГКЛ в дополнение к модуляции общим объёмом солнечного ветра.

Источник финансирования. Работа частично поддержана программой № 28 фундаментальных исследований Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврухина А.К., Устинова Г.К. Метеориты — зонды вариаций космических лучей. М.: Наука, 1990. 262 с.
2. Алексеев В.А., Устинова Г.К. // Геохимия. 2006. № 5. С. 467–482.
3. Устинова Г.К. // ДАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 289–293.
4. Meier M.M.M. Meteorites with Photographic Orbits // <http://www.meteoriteorbits.info>. 2016.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1988. С. 51–57.
6. Usoskin I.G., Desorgher L., Velinov P., et al. // Acta Geophys. 2009. V. 57. № 1. P. 88–101. DOI: 10.2478/s11600-008-0019-9.
7. Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B., et al. The Astroparticle Phys. Conf. arXiv: 1411.7534v.1 [astro-ph. SR] 27 Nov. 2014.
8. McKibben R.B., O'Gallagher J.J., Pyle K.R., Simpson J.A. Proc. 15th Intern. Cosm. Ray Conf. 1977. Plovdiv, V. 3. P. 240–245.
9. Venkatesan D., Decker R.B., Krimigis S.M. Proc. 20th Intern. Cosm. Ray Conf. Moscow, 1987. V. 3. P. 385–388.
10. Parker E.N. Cosmic Magnetic Fields. Oxford: Clarendon Press, 1979. 841 p.
11. Lavrukhina A.K., Ustinova G.K. // Adv. Space Res. 1981. V. 1. № 3. P. 143–146.
12. Lavrukhina A.K., Ustinova G.K. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1972. V. 15. № 4. P. 347–360.
13. Alexeev V.A., Laubenstein M., Povinec P.P., Ustinova G.K. // Adv. Space Res. 2015. V. 56. P. 766–771. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.004.
14. McKibben R.B., Connell J.J., Lopate C., et al. // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 1217–1228.
15. Lavrukhina A.K., Ustinova G.K. // Nature. 1971. V. 232. № 5311. P. 462–463.

VARIATIONS OF COSMOGENIC RADIONUCLIDE PRODUCTION RATES IN CHONDRITES OF KNOWN ORBITS

G. K. Ustinova, V. A. Alexeev

Presented by Academician of the RAS M.Ya. Marov October 10, 2018

Received October 24, 2018

The results of multiyear investigations of cosmogenic radionuclide production rates along the orbits of 42 chondrites, fallen successively to the Earth in 1959–2016 are presented. They constitute a long set of homogeneous data, statistical smoothing of which demonstrates some main regularities of distribution and variation of the galactic cosmic rays (GCR) with energy > 100 MeV in the internal (< 5 AU) heliosphere. This set is exclusive, and it has timeless importance for all the future investigations of magneto-hydrodynamic peculiarities of the GCR solar modulation mechanism. Analysis of ^{26}Al contents in 10 chondrites of known orbits allowed us to deduce a spatial profile of the GCR intensity ($E > 100$ MeV), averaged over a 1 My in the internal heliosphere, testifying to permanent development and dissipation of a layer of the solar wind magnetic irregularities, which efficiently modulates cosmic radiation. It suggests a constancy of magneto-hydrodynamic environment in the Solar system at least for the last million years.

Keywords: internal heliosphere, magneto hydrodynamic processes, solar modulation, galactic cosmic rays, cosmogenic radionuclides, meteorites.

УДК 532.6

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ КАПЕЛЬ И БОЛЬШОЙ СОВОКУПНОСТИ ПОСЛЕДНИХ В СОСТАВЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА

О. В. Высокоморная^{1,*}, академик РАН А. К. Ребров²,
П. А. Стрижак^{1,**}, Н. Е. Шлегель¹

Поступило 15.10.2018 г.

Представлен сравнительный анализ экспериментальных результатов, полученных разными исследованиями с использованием двух различных экспериментальных подходов: феноменологического (регистрация условий, характеристик и режимов взаимодействия капли-снаряда и капли-мишени) и статического (анализ процессов столкновений десятков и даже сотен капель жидкостей в составе аэрозоля). Установлены диапазоны значений критерия Вебера (базового параметра, используемого для анализа последствий столкновений капель в газовой среде), соответствующие отскоку, коагуляции, разлёту, дроблению по результатам всех рассмотренных экспериментальных работ.

Ключевые слова: капля, аэрозольный поток, столкновение, отскок, коагуляция, разлёт, дробление, критерий Вебера.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485138-43>

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты коагуляции, дробления и фрагментации капель жидкостей существенно влияют на характеристики многофазных и многокомпонентных потоков, которые активно применяются в группе перспективных ресурсосберегающих газопарокапельных технологий [1–3]. Эти технологии основаны на движении элементов многофазных и многокомпонентных сред по сложным траекториям и в разных тепловых условиях [3–5]. Их объединяют [3] слабо изученные эффекты отскока, коагуляции, дробления и фрагментации капель, которые оказывают существенное влияние на структуру и свойства многофазных и многокомпонентных сред [6–10].

К настоящему времени известны результаты экспериментов по изучению упомянутых эффектов, выполненных с применением двух существенно различающихся подходов [6–12]. Первый (феноменологический) [8, 9, 11, 12] основан на регистрации условий, характеристик и режимов взаимодействия двух капель (первая — мишень, вторая — снаряд), а второй (статистический) [6, 7, 10] предполагает статистический анализ процессов столкновений десятков и даже сотен капель жидкостей в составе

аэрозоля. В результате применения двух указанных подходов предприняты попытки обобщения экспериментальных данных с использованием современной теории взаимодействия капель жидкостей [10–12]. Однако пока недостаточно экспериментальной информации для достоверного прогнозирования характеристик соответствующих процессов и повышения эффективности газопарокапельных технологий (особенно в условиях высоких температур, способствующих интенсификации изменения состава и структуры газопарокапельных смесей).

Цель настоящей работы — определение различий количественных значений характеристик режимов взаимодействия капель воды в газовой среде за счёт анализа известных экспериментальных данных и при проведении опытов с использованием двух указанных подходов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналогично опытам [6, 7] применялся стенд, позволяющий регистрировать условия и характеристики процессов смешения встречно направленных капельного и газового потоков с варьируемой температурой, структурой и составом получаемой газопарокапельной смеси. В настоящей работе основное внимание уделено высокоскоростной видеорегистрации процессов столкновений капель в составе аэрозоля. Для этого применялось специализированное программное обеспечение Tema Automotive, позволяющее выполнять непрерывное

¹Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

*E-mail: vysokomornaja@tpu.ru

**E-mail: pavelspa@tpu.ru

слежение за перемещающимися каплями. Параметры потока капель: начальные размеры $R_d = 0,1-1$ мм; относительная объёмная концентрация $\gamma_d = 0,001-0,0012$ м³ каплей жидкости на 1 м³ газа; максимальная скорость движения капель $U_d = 10$ м/с. Параметры газового потока: температура $T_g = 20-900$ °С (воздух или продукты сгорания керосина), максимальная скорость движения $U_g = 10$ м/с. Для контроля U_g использовался оптический метод PIV, U_d — метод PTV. Погрешности определения скоростей U_g и U_d не превышали 1,6%.

Аналогично экспериментам [6, 7] исследования проводили для капель полидисперсного водяного потока. Размеры капель R_d измеряли с использованием метода IPI, регистрирующего размеры сферических и каплевидных тел по среднему радиусу или диаметру. Систематические погрешности определения R_d не превышали 2,1%. Также при обработке видеogramм экспериментов определяли углы пересечения траекторий движения капель α в момент их столкновения с использованием специализированного программного обеспечения и параметрической сетки на видеogramмах.

В отличие от опытов [6, 7], в настоящей работе при обработке результатов опытов одновременно учитывали кадры видеogramм, полученные с применением двух камер, расположенных перпендикулярно друг другу. Это позволяло более достоверно регистрировать не только угол между траекториями перемещения капель, но и последствия распада последних. Кроме того, в отличие от экспериментов [6, 7], было обработано более чем 500 кадров для формирования минимальной статистической базы характеристик и режимов взаимодействия капель. Также проводили опыты с направлением двух капилляров (устанавливались вместо форсуночных устройств) под варьируемым углом с целью уточнения результатов опытов с аэрозолем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В известных экспериментальных работах [8–10], посвящённых исследованию характеристик постановочных столкновений двух капель (так называемых мишени и снаряда), выделяются пять основных режимов: 1) слияние (коагуляция) двух капель в одну более крупную; 2) отскок капель друг от друга (взаимодействие через газовую или паровую прослойку между каплями); 3) кратковременное слияние с последующим разрушением; 4) пробивание мишени снарядом с образованием нескольких крупных вторичных капель; 5) взрывное дробление первичных капель с образованием множества мелких

вторичных капель. При этом авторы [8–10] по результатам своих исследований формулируют достаточно строгие диапазоны значений основного критерия — числа Вебера We , в которых прогнозируют лишь один из возможных режимов столкновения с нулевой вероятностью возникновения других.

Эксперименты с выборкой и анализом столкновений двух капель в аэрозольном потоке позволили выделить следующие режимы взаимодействия: коагуляция, отскок, разлёт, дробление (рис. 1). При проведении настоящего исследования, а также более ранних опытов с анализом режимов взаимодействия двух капель в аэрозольном потоке было отмечено, что при определённых соотношениях размеров капель и их скоростей вероятность возникновения одного из режимов может являться преобладающей и не исключает возможности реализации других.

Также следует отметить и то, что схожим по описанию режимам взаимодействия капель в постановочных экспериментах и опытах с аэрозолем соответствуют разные диапазоны значений We . Сравнительные данные о соотношении числа Вебера и вероятности возникновения каждого из режимов взаимодействия при столкновениях представлены в табл. 1.

Приведённые в табл. 1 данные дают возможность сформулировать достаточно ограниченные диапазоны изменения значений We , которые соответствовали бы одному из выделенных режимов взаимодействия капель воды во всех проанализированных работах. Достоверно (т.е. относительная вероятность близка к единице) наблюдать отскок капель при столкновении можно в условиях $We = 0,35-0,5$. Вероятность коагуляции капель максимальна в диапазоне $We = 1-7,5$; достоверно прогнозировать разлёт можно при $We = 15-50$. Дробление капель чаще всего возникает при значениях $We > 50$, однако даже в этих условиях вероятность такого режима по данным проведённых экспериментов составляет около 30%. Отличия экспериментальных результатов настоящей работы и авторов [6–10] объясняются разными подходами при планировании и проведении исследований: воспроизведение столкновений двух капель путём наведения капли-снаряда на каплю-мишень и условия взаимодействия капель как элементов распылённой жидкости в газовом потоке. Условия в опытах со столкновением мишеней и снарядов [8–10] можно считать несколько идеализированными, исключая взаимное влияние множества соседних капель при движении в аэрозольном потоке (сложные траектории, меняющиеся концентрации и формы капель, смещения центров масс, накладывание траекторий движения, изменение

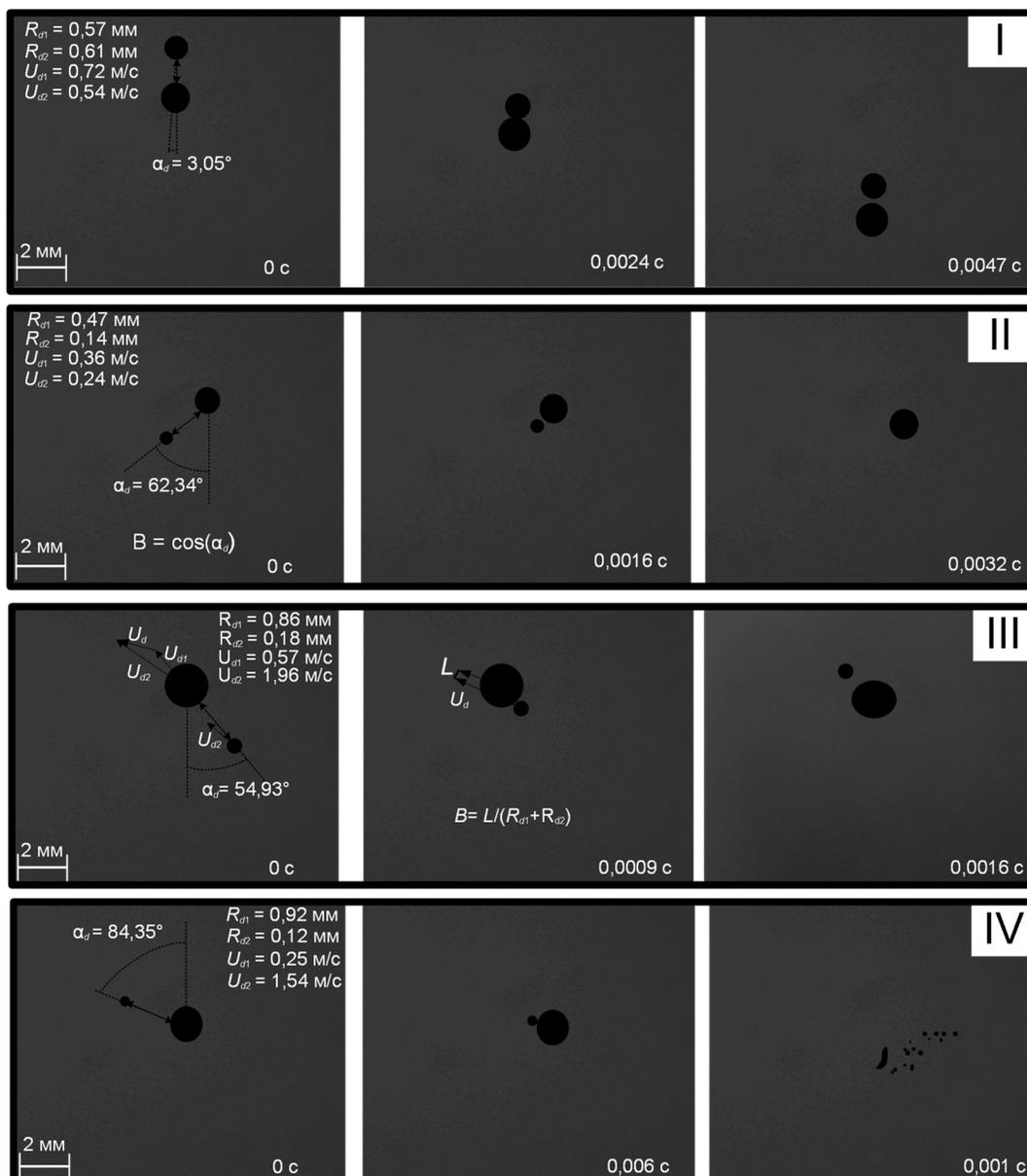


Рис. 1. Типичные кадры с иллюстрацией четырёх основных режимов взаимодействия капель воды в газовой среде при их столкновении: I — отскок, II — коагуляция, III — разлёт, IV — дробление.

скорости диффузии и конвекции, формирование температурных и аэродинамических следов, меняющееся давление в окрестности капель и т.д.). Эксперименты, описанные в работах [6, 7], более приближены к реальным процессам, протекающим в аэрозольных технологиях. Однако и их результаты нельзя считать полностью учитывающими всю совокупность значимых факторов, влияющих на характеристики столкновений капель жидкостей при движении в газовых средах. Важнейшей характеристикой сталкивающихся капель является их форма, которая циклически меняется в процессе движения и может насчитывать до 10 разновидностей (“сфера”, “блин”, “эллипс”, “парашют”, “зонт”

и пр.). Вероятно, не менее существенное влияние на последствия столкновений капель оказывают и такие факторы, как угол между векторами их скоростей, концентрация капель в единице объёма, состав распылённой жидкости, наличие фазового перехода и др.

В качестве углового параметра взаимодействия капель в настоящей работе использован $\beta = \cos \alpha_d$, где α_d — угол атаки. Также при обработке видеogramм экспериментов вычисляли относительный линейный параметр взаимодействия капель $B = L / (R_{d1} + R_{d2})$, где L — расстояние между центрами масс капель, м; R_{d1} и R_{d2} — радиусы сталкивающихся капель, м. Параметр B косвенно позволяет учитывать

Таблица 1. Соответствие значений критерия Вебера и относительных вероятностей реализации режимов взаимодействия двух капель при их столкновениях

Последствие столкновения	We, P			
	[8, 9]	[10]	[6, 7]	Данные настоящей работы
Отскок	$0 < We < 0,5, P = 1$	$0,35 < We < 0,7, P = 1$	—	$0,03 < We < 1,7, P = 0,24$
Коагуляция	$0,7 < We < 15, P = 1$	$1 < We < 7,5, P = 1$	$We = 0,2, P = 0-0,2$ $0,16 < We < 0,19, P = 0,2-0,4$ $0,156 < We < 0,16, P = 0,4-0,6$ $0,107 < We < 0,156, P = 0,6-0,8$ $0,067 < We < 0,107, P = 0,8-1$	$0 < We < 15, P = 0,98$ $15 < We < 50, P = 0,67$ $50 < We < 100, P = 0,15$ $We > 100, P = 0,29$
Разлёт	$15 < We < 100, P = 1$	$7,5 < We < 50, P = 1$	$0,113 < We < 0,181, P = 0-0,1$ $0,181 < We < 0,257, P = 0,1-0,2$ $0,257 < We < 0,264, P = 0,2-0,3$ $0,264 < We < 0,329, P = 0-0,1$ $0,329 < We < 0,34, P = 0,3-0,4$	$0 < We < 15, P = 0,004$ $15 < We < 50, P = 0,31$ $50 < We < 100, P = 0,84$ $We > 100, P = 0,43$
Дробление	$We > 100, P = 1$	$We > 50, P = 1$	$0,13 < We < 0,217, P = 0-0,2$ $0,217 < We < 0,32, P = 0,2-0,4$ $0,32 < We < 0,39, P = 0,4-0,6$	$0 < We < 15, P = 0,016$ $15 < We < 50, P = 0,02$ $50 < We < 100, P = 0,1$ $We > 100, P = 0,28$

влияние количества и концентрации капель в потоке на последствия их столкновений. Также можно предположить, что вклад скорости и размера капель (две основные характеристики для вычисления параметра We) не равноценен при прогнозировании режимов их взаимодействия. Это предположение подтверждают данные, приведённые на рис. 2 и 3, — диапазоны возникновения каждого из четырёх ключевых режимов взаимодействия существенно различаются при варьировании скорости движения капель и постоянстве их диаметра, и наоборот. Полученные экспериментальные результаты позволяют также сформулировать предположение о существенной роли относительной скорости с учётом значений U_{d1}

и U_{d2} , а также соотношения радиусов R_{d1}/R_{d2} капель при их взаимодействии. В частности, при идентичных значениях We результатом столкновения крупных капель является коагуляция, а более мелких, но с большей скоростью — интенсивное дробление. Соответствующие трём режимам (коагуляция, разлёт, дробление) области в системе координат $B(We)$ и $\beta(We)$ существенно различаются при условиях варьирования только R_d или U_d (лишь отскоку соответствуют ограниченные диапазоны изменения B, β, We). И коагуляция, и дробление заметно изменяют структуру газопарокапельного потока, поэтому важно корректно строить карты режимов взаимодействия (рис. 2, 3) и определять области устойчивой

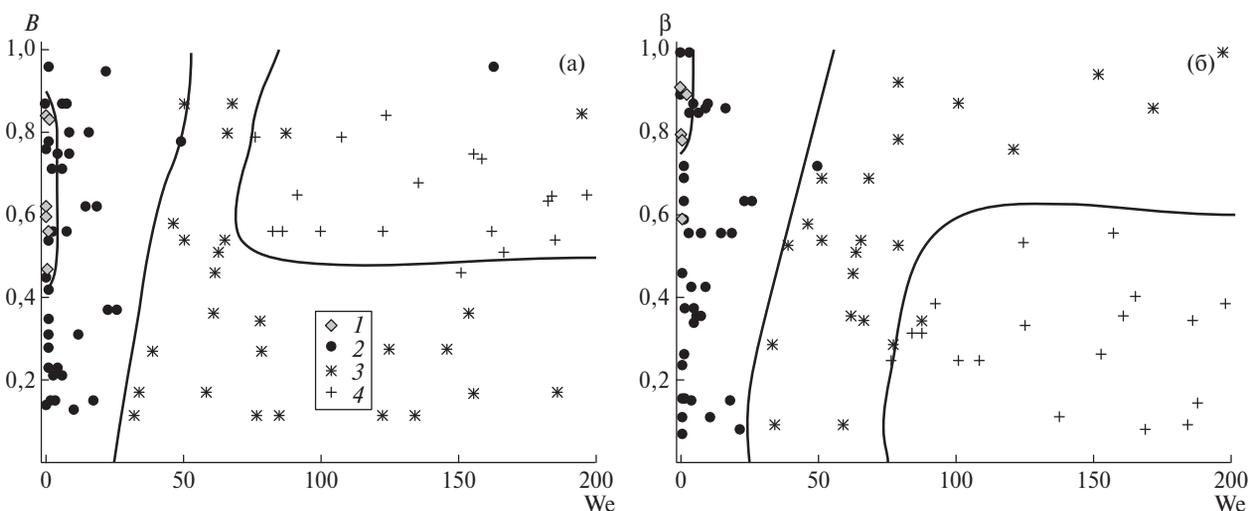


Рис. 2. Карта режимов взаимодействия капель с учётом углового (а) и линейного (б) параметров их соударения и числа We ($R_d = \text{const}, U = \text{var}$) при постоянстве среднего размера R_d . Здесь и на рис. 3: 1 — отскок; 2 — коагуляция; 3 — разлёт; 4 — дробление.

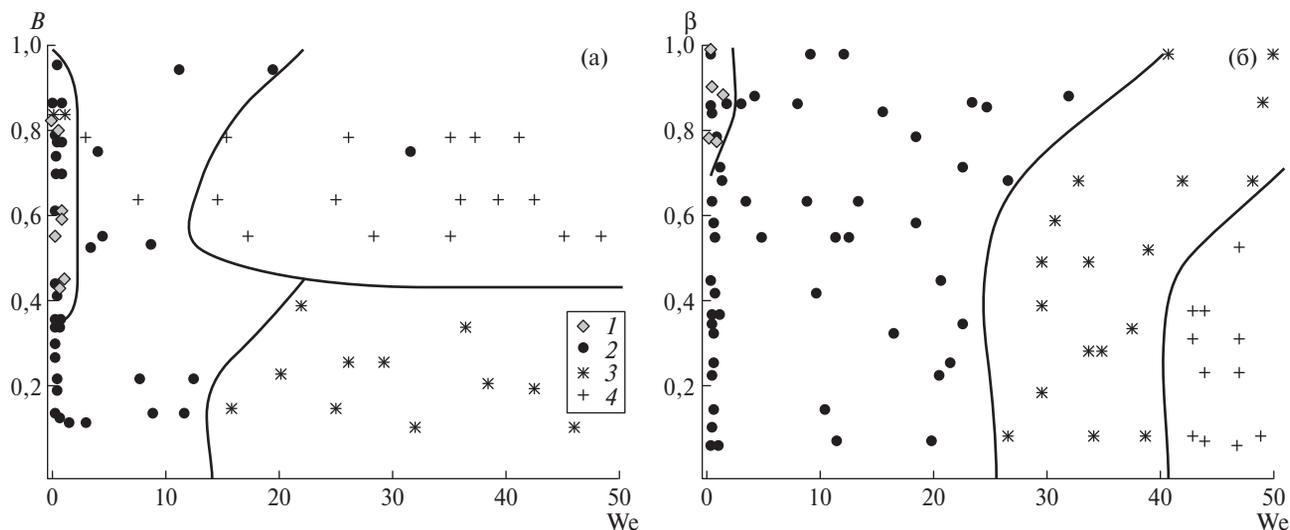


Рис. 3. Карта режимов взаимодействия капель с учётом углового (а) и линейного (б) параметров их соударения и числа We ($U_d = \text{const}$, $R_d = \text{var}$) при постоянстве скорости движения U_d .

реализации каждого из четырёх режимов. Учитывать лишь диапазон изменения числа Вебера, как показано в табл. 1, недостаточно (важно принимать во внимание роль B и β с учётом разномасштабного влияния скорости и размера капель).

Для разработки достоверных прогностических моделей, позволяющих выполнять оценку вероятностей режимов столкновений капель в реальных технологиях, целесообразно исследовать детально все выделенные факторы. При распылении неоднородных жидкостей (растворов, эмульсий, суспензий), часто применяющихся в самых разных технологиях, количество факторов, которые необходимо учитывать при прогнозировании, существенно увеличивается. Поэтому при подобных исследованиях важно использовать подходы и методы, позволяющие наиболее полно оценить масштабы влияния всех значимых факторов, т.е. совместно применять подходы как с аэрозольными потоками, так и с идеализированными столкновениями двух капель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам даже высокоскоростной видеорегистрации и специализированного программно-аппаратного комплекса слежения в аэрозольном потоке сложно выделить все возможные режимы столкновений капель жидкостей, как в опытах с двумя каплями в идеализированных условиях. Тем не менее условия отскока, коагуляции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель можно регистрировать достоверно при варьировании параметров аэрозолей и газов в широких диапазонах. Новизна результатов настоящего исследования состоит в том, что впервые показаны отличия послед-

ствий столкновений капель в условиях, соответствующих реальным газопарокапельным технологиям, от типичных для лабораторных экспериментов. Выполнены экспериментальные оценки влияния углового и линейного параметров взаимодействия капель на вероятность возникновения основных режимов взаимодействия с учётом доминирования влияния размеров и скоростей перемещения капель.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт средств РНФ (проект 18–71–10002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paruchuri S., Brenner M.P. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. Article ID134502.
2. Eggers J., Villermaux E. // Rept. Prog. Phys. 2008. V. 71. ID036601.
3. Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D. // Phys. Fluids. 2012. V. 24. 122105.
4. Varaksin A.Y. // High Temp. 2013. V. 51. P. 377–407.
5. Sazhin S.S. // Fuel. 2017. V. 196. P. 69–101.
6. Кузнецов Г.В., Волков П.С., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 17. С. 53–60.
7. Антонов Д.В., Волков П.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 1. С. 94–103.
8. Архипов В.А., Ратанов Г.С., Трофимов В.Ф. // ПМТФ. 1978. № 2. С. 73–77.
9. Архипов В.А., Васенин И.М., Трофимов В.Ф. // ПМТФ. 1983. № 3. С. 95–98.
10. Пажжи Д.Г., Галусто В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984.
11. Orme M. // Prog. Energy Comb. Sci. 1997. V. 23. № 1. P. 65–79.
12. Pawar S.K., Henrikson F., Finotello G., Padding J.T., Deen N.G., Jongsma A., Innings F., Kuipers J.A.M.H. // Powd. Tech. 2016. V. 300. P. 157–163.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INTERACTION REGIMES OF TWO DROPS AND THEIR LARGE POPULATION IN AN AEROSOL CLOUD

**O. V. Vysokomornaya, Academician of the RAS A. K. Rebrov,
P. A. Strizhak, N. E. Shlegel**

Received October 15, 2018

A comparative analysis of experimental results obtained by different researchers using two different experimental approaches is presented: phenomenological (registration of conditions, characteristics and modes of interaction between a drop of a shell and a target drop) and statistical (analysis of collisions of tens and even hundreds of drops of liquids as part of an aerosol). The ranges of Weber criterion values (the basic parameter used for analyzing the effects of collisions of droplets in a gaseous medium) are established, corresponding to bounce, coalescence, reflexive and stretching separation, disruption, according to the results of all considered experimental research. The bounce of droplets upon collision can be observed under the conditions $We = 0.35-0.5$; the probability of droplet coalescence is maximum in the range $We = 1-7.5$; it is possible to reliably predict spreading at $We = 15-50$; splitting of droplets most often occurs at values $We > 50$. The probability of occurrence of other scenarios in the selected We ranges is not zero. The conclusion about the need to combine experimental techniques to obtain the most reliable data and their further use in the development of prognostic models is formulated.

Keywords: drop, aerosol stream, collision, bounce, coalescence, reflexive and stretching separation, disruption, Weber criterion.

УДК 547.785.59

**СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НОВЫХ ПОЛИГЕТЕРОАРИЛЕНОВ
НА ОСНОВЕ 2,3,5,6-ТЕТРААМИНОПИРИДИНА****И. И. Пономарев^{1,*}, Д. Ю. Разоренов¹, Ив. И. Пономарев¹,
Ю. А. Волкова¹, К. М. Скупов^{1,**}, А. А. Лысова²,
член-корреспондент РАН А. Б. Ярославцев²**

Поступило 05.10.2018 г.

Синтезированы и охарактеризованы два новых полигетероарилена (полидиимидазопиридина) на основе 2,3,5,6-тетрааминопиридина и ароматических дикарбоновых кислот. Полимеры характеризуются высокими вязкостными характеристиками и выдающейся термоокислительной устойчивостью. Полидиимидазопиридин, содержащий фосфорнокислотную группу, обладает отличными плёнообразующими свойствами и может быть переработан в протонпроводящие мембраны, обладающие рекордными значениями протонной проводимости в диапазоне температур 20–200 °С после допирования *o*-фосфорной кислотой.

Ключевые слова: 2,3,5,6-тетрааминопиридин, полигетероарилены, протонпроводящие полимерные мембраны, протонная проводимость, топливные элементы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485144-47>

Ароматические полимеры, содержащие в основной цепи конденсированные гетероциклы — полигетероарилены (ПГА), представляют значительный интерес для создания материалов (плёнок, покрытий, волокон, композитов и др.), эксплуатируемых в экстремальных условиях в интервале температур от жидкого гелия (–269 °С) до 400–600 °С в зависимости от состава окружающей среды и времени экспозиции [1]. Например, ПГА на основе ароматических тетрааминов и дикарбоновых кислот — полибензимидазолы (ПБИ) широко используются в качестве базового продукта для получения твёрдополимерной протонпроводящей мембраны (ППМ) высокотемпературного водородного топливного элемента (ТЭ), эксплуатируемой в среде агрессивной фосфорной кислоты при 150–200 °С в течение нескольких тысяч часов, т.е. в весьма жёстких условиях.

Наиболее широко исследованными ПБИ являются: коммерчески доступный Celazole[®] (BASF) на основе изофталевой кислоты и 3,3'-диаминобензидина и АВРВИ на основе 3,4-диаминобензойной кислоты [2]. Поиск новых ПБИ и близких по химическому строению высокомолекулярных соединений остаётся актуальным, и дальнейшее развитие данной

области полимерной химии, по нашему мнению, связано с возможностью получения функционализированных полимеров, обладающих протонпроводящими свойствами при температурах выше 120 °С в безводных условиях. Этому критерию могут отвечать ПГА, содержащие в своём составе конденсированные бензольные, пиридиновые, имидазольные и иные циклы, желателен в сочетании с химически связанными фосфонатными (НО)₂Р(О)-группами [3]. С этой целью нами впервые синтезированы полидиимидазопиридины (ПДИП) на основе 2,3,5,6-тетрааминопиридина, 2,5-пиридиндикарбоновой кислоты или 10-гидрокси-10-оксо-10Н-10λ⁵-феноксафосфин-2,8-дикарбоновой кислоты, исследованы их принципиально важные свойства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2,3,5,6-тетрааминопиридин (ТАП) в виде тригидрохлорида моногидрата (ТАП · 3НСl · Н₂О) получали по методике [4], 10-гидрокси-10-оксо-10Н-10λ⁵-феноксафосфин-2,8-дикарбоновую кислоту — по методике [5]. Остальные вещества: 2,5-пиридиндикарбоновая кислота, 84%-я полифосфорная кислота (ПФК), метансульфо кислота, фосфорный ангидрид, трифторуксусная и муравьиная кислоты — приобретены у фирмы “Акрус” и использованы без дополнительной очистки.

Синтез полимеров в ПФК. Смесь 0,713 г (0,002 моль) 10-гидрокси-10-оксо-10Н-10λ⁵-феноксафосфин-2,8-дикарбоновой кислоты (или 0,334 г 2,5-пиридиндикарбоновой кислоты) интен-

¹ Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской Академии наук, Москва

² Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской Академии наук, Москва

*E-mail: gagapon@ineos.ac.ru

**E-mail: kskupov@gmail.com

сивно перемешивали в 10 г ПФК в токе аргона при 80 °С в течение 4 ч с 0,533 г (0,002 моль) ТАП · 3HCl · H₂O. Затем нагревали 1 ч при 120 °С, после чего добавляли 2,5 г P₂O₅, поднимали температуру до 140 °С, 160 °С с выдержкой по 3 ч при каждой из этих температур и далее 20 ч при 180 °С. Почти твёрдый реакционный раствор охлаждали до 140 °С, разбавляли 20 мл 85%-й H₃PO₄, выливали в воду, диспергировали, образовавшийся осадок отделяли, промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции, экстрагировали MeOH в аппарате Сокслета и сушили в вакууме при 100 °С в течение 10 ч.

Спектры ЯМР ¹H и ³¹P исследованных соединений были зарегистрированы на приборе Bruker AMX-400 (400,13 МГц и 161,98 МГц соответственно) в растворе DMSO-d₆. Инфракрасные спектры поглощения образцов снимались на ИК-фурье-спектрометре Magma-IR750 Nicolet в области 4000–400 см⁻¹, образцы готовили в виде таблеток с KBr или тонких плёнок.

Измерения ионной проводимости проводили с помощью импедансметра Z500 PRO (“Элинс”, Россия) в диапазоне частот 10–2 · 10⁶ Гц в потенциостатическом режиме с амплитудой синусоидального сигнала 100 мВ с графитовыми электродами. Перед измерением мембрана отжималась фильтровальной бумагой для удаления влаги и фосфорной кислоты. Проводимость измеряли в интервале температур 2–200 °С с шагом в 10–15 °С. Величину проводимости рассчитывали экстраполяцией полуокружностей объёмной составляющей проводимости на ось активных сопротивлений.

Для контроля хода реакций и чистоты использованных продуктов использовали тонкослойную хроматографию на пластинах Silufol UV-254. Динамический термогравиметрический анализ (ТГА) проводили на дериватографе Q-1000 (МОМ) на воздухе при скорости подъёма температуры 5 °С/мин, навеска образца составляла 40–60 мг. Приведённую вязкость измеряли в капиллярном вискозиметре Уббелодде при 25 °С в метансульфонокислоте. Характеристические вязкости [η] получены экстраполяцией линейной зависимости η_{уд}/с на нулевую концентрацию. Исходная концентрация растворов полимеров 0,5 г/дл. Растворы и растворители перед измерениями термостатировали при температуре измерений в течение 1 ч.

Полимерные плёнки полимера **1** отлиты из 3%-го раствора в смеси муравьиной и трифторуксунной кислоты (1 : 1 по объёму) на стеклянную подложку и после длительного кипячения в воде прогреты на воздухе при 330 °С в течение 1 ч для структурирования. Сшитые плёнки допировали в 77%-й H₃PO₄ при 60 °С в течение трёх суток, а затем хранили в 85%-й H₃PO₄.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Новые ПДИП на основе 2,3,5,6-тетрааминопиридина были синтезированы в растворе 84%-й ПФК по методикам, которые подробно описаны в литературе [1–5] и в определённых пределах позволяют синтезировать высокомолекулярные ПГА на основе тетрааминов и дикарбоновых кислот (схема 1).

После выделения из реакционных растворов полимеры **1** и **2** тщательно измельчали и подвергали

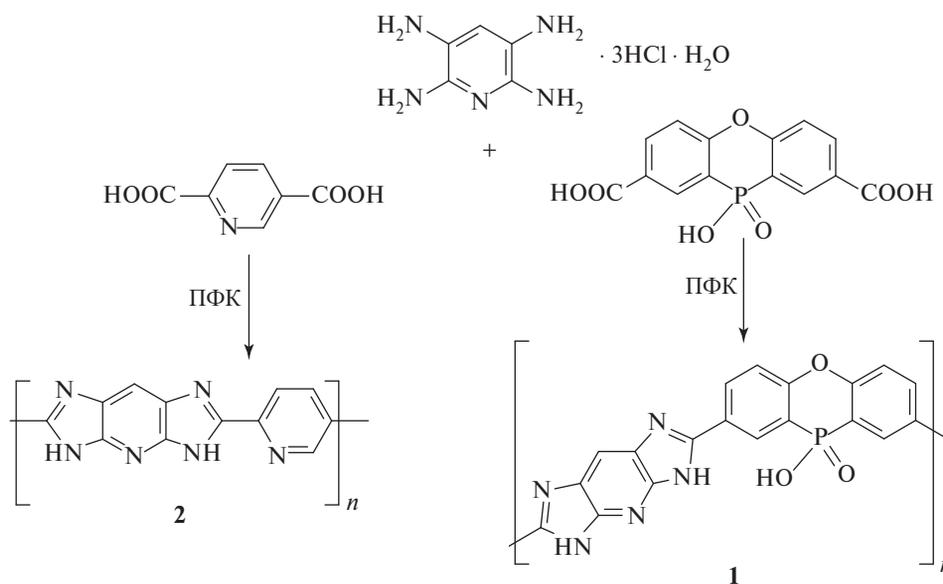


Схема 1

длительной обработке водой и экстракции метанолом в аппарате Сокслета для полного удаления остатков фосфорных кислот. Строение полимеров подтверждено спектрами ЯМР ^1H и ^{31}P .

Растворимость полимеров оказалась несколько неожиданной; так, оба полимера не растворяются в 98%-й серной кислоте, муравьиной и трифторуксусной кислотах, но дают 5–10%-е растворы в метансульфонокислоте (МСК). Приведённые вязкости 0,5%-х растворов в МСК составляют 5,41 и 3,73 дл/г, а характеристические 3,70 и 2,83 дл/г соответственно для ПДИП-1 и ПДИП-2, что косвенно подтверждает высокие молекулярные веса синтезированных полимеров и возможность получения плёнок на их основе.

Получить плёнки ПДИП-1 и ПДИП-2 из МСК не удалось ввиду её высокой температуры кипения и низкой летучести, однако весьма неожиданным явился факт растворимости ПДИП-2 в смеси муравьиной и трифторуксусной кислот (1 : 1 по объёму). Прочные плёнки на его основе были отлиты на стеклянные подложки из растворов в смеси $\text{HCOOH}/\text{CF}_3\text{COOH}$, после термообработки в вакууме при 140 °С они имеют хорошие физико-механические характеристики (разрывная прочность 100–120 МПа, относительное удлинение при разрыве 12–18% и модуль Юнга 3000–3500 МПа).

Строение полученных полимеров подтверждается данными ИК-фурье-спектроскопии (рис. 1).

На ИК-спектре наблюдается характерная сильная полоса $\text{P}=\text{O}$ валентных колебаний фосфонатов при 1238 см^{-1} . Строение полимеров подтверждают также и данные ИК-спектроскопии. В их ИК-спектрах представлены широкие полосы ассоциированных гидроксильных групп в области $2500\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ и сильные полосы валентных колебаний фосфонатных групп в области $1150\text{--}1280\text{ см}^{-1}$ [6].

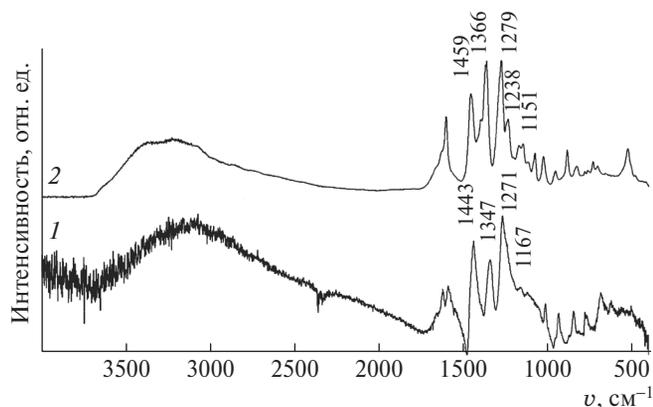


Рис. 1. ИК-фурье-спектры ПДИП-1 (1, таблетка КВг) и ПДИП-2 (2, плёнка).

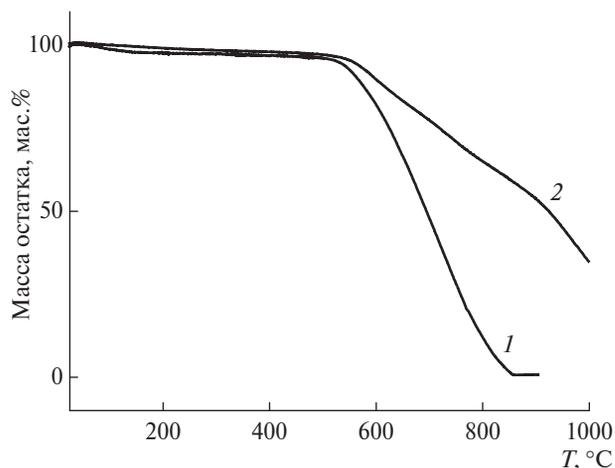


Рис. 2. Данные ТГА для ПДИП-1 (1) и ПДИП-2 (2).

Согласно данным ТГА (рис. 2), на воздухе окислительная термодеструкция ПДИП 1 и 2 на воздухе начинается лишь выше 520 °С. Следует отметить, что, в отличие от чисто органических ПБИ, полимер 2 сохраняет при 1000 °С не менее 30% исходной массы, образуя твёрдый несгораемый кокс.

По данным импедансной спектроскопии, протонная проводимость плёночных образцов, полученных на базе ПДИП-2 с последующим допированием 50%-й *o*-фосфорной кислотой, достигает 280 мСм/см при 160 °С, что практически на порядок превышает проводимость исследованного ранее кардового полимера ПБИ-О-ФТ [7–10], использованного нами в качестве мембраны для топливного элемента [11–15], и другие мировые аналоги [2]. При этом температура, при которой полимер устойчив в присутствии H_3PO_4 , на 15–20 °С выше. В области

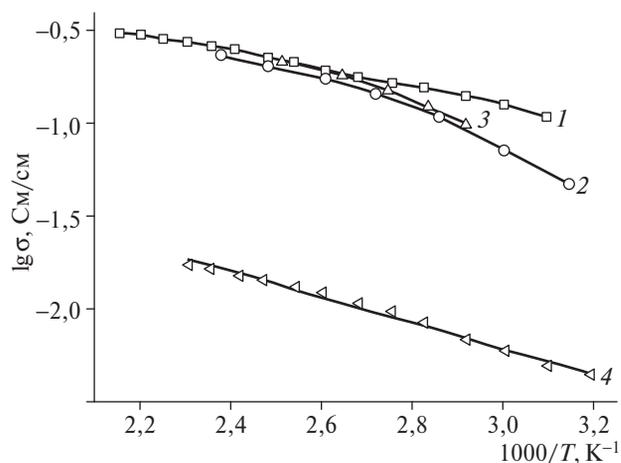


Рис. 3. Температурные зависимости проводимости мембран ПДИП-2/65%-я H_3PO_4 , полученные в непрерывном режиме нагрев (1) — охлаждение (2) — нагрев (3). Для сравнения приведена проводимость ранее исследованного полимера ПБИ-О-ФТ/75%-я H_3PO_4 (4).

температур до 90–100 °С кривые нагрева (1) и охлаждения (2) не совпадают, что связано с процессами дегидратации, проходящими во время первого нагрева. Энергия активации проводимости, рассчитанная из уравнения Аррениуса, составляет $9,1 \pm 0,2$ кДж/моль.

Таким образом, в настоящей работе на основе 2,3,5,6-тетрааминопиридина созданы новые ПГА-полидиимидазопиридины, в том числе фосфорсодержащий, обладающий хорошими плёнкообразующими свойствами, выдающейся термостойкостью и протонной проводимостью после обработки фосфорной кислотой.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность ЦКП ИНЭОС РАН, а также М.И. Бузину за проведение ТГА полимеров и З.С. Клеменковой за снятие ИК-спектров.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 18–13–00421).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршак В.В. Термостойкие полимеры. М.: Наука, 1969. 411 с.
2. Li Q., Aili D., Hjuler H.A., Jensen J.O. High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, Approaches, Status and Perspectives. Cham: Springer, 2016. 545 p.
3. Пономарев Ив.И., Пономарев И.И., Петровский П.В., Волкова Ю.А., Разоренов Д.Ю., Горюнова И.Б., Старикова З.А., Фоменков А.И., Хохлов А.Р. // ДАН. 2010. Т. 432. № 5. С. 632–638.
4. Sikkema D.J. // Polymer. 1998. V. 39. P. 5981.
5. Пономарев И.И., Рыбкин Ю.Ю., Горюнов Е.И., Петровский П.В., Лысенко К.А. // Изв. АН. Сер. хим. 2004. № 12. P. 2762.
6. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. М.: Мир, 1976. 541 с.
7. Kondratenko M.S., Ponomarev I.I., Gallyamov M.O., Razorenov D.Y., Volkova Y.A., Kharitonov E.P., Khokhlov A.R. // Beilstein J. Nanotechnol. 2013. V. 4. P. 481.
8. Пономарев И.И., Разоренов Д.Ю., Пономарев Ив.И., Волкова Ю.А., Скупов К.М. // Электрохимия. 2014. Т. 50. С. 773.
9. Стенина И.А., Ярославцев А.Б. // Неорганич. материалы. 2017. Т. 53. С. 335.
10. Лысова А.А., Пономарев И.И., Ярославцев А.Б. // ЖНХ. 2012. Т. 57. С. 3.
11. Пономарев И.И., Пономарев Ив. И., Филатов И.Ю., Филатов Ю.Н., Разоренов Д.Ю., Волкова Ю.А., Жигалина О.М., Жигалина В.Г., Гребенев В.В., Киселев Н.А. // ДАН. 2013. Т. 448. № 6. С. 670–674.
12. Пономарев И.И., Скупов К.М., Разоренов Д.Ю., Жигалина В.Г., Жигалина О.М., Пономарев Ив.И., Волкова Ю.А., Кондратенко М.С., Букалов С.С., Давыдова Е.С. // Электрохимия. 2016. Т. 52. С. 823.
13. Скупов К.М., Пономарев И.И., Разоренов Д.Ю., Жигалина В.Г., Жигалина О.М., Пономарев Ив.И., Волкова Ю.А., Вольфович Ю.М., Сосенкин В.Е. // Электрохимия. 2017. Т. 53. С. 820.
14. Zhigalina V.G., Zhigalina O.M., Ponomarev I.I., Skupov K.M., Razorenov D.Y., Ponomarev I.I., Kiselev N.A., Leitinger G. // CrystEngComm. 2017. V. 19. P. 3792.
15. Skupov K.M., Ponomarev I.I., Razorenov D.Y., Zhigalina V.G., Zhigalina O.M., Ponomarev I.I., Volkova Y.A., Volkovich Y.M., Sosenkin V.E. // Macromol. Symp. 2017. V. 375. 1600188.

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF NEW 2,3,5,6-TETRAAMINOPYRIDINE BASED POLYHETEROARYLENES

I. I. Ponomarev, D. Yu. Razorenov, Iv. I. Ponomarev, Yu. A. Volkova,
K. M. Skupov, A. A. Lysova, Corresponding Member of the RAS A. B. Yaroslavtsev

Received October 5, 2018

Two new polyheteroarylenes (polydiimidazopyridines) based on 2,3,5,6-tetraaminopyridine and aromatic dicarboxylic acids were synthesized and characterized. The polymers show high viscosity properties and exceptional thermooxidative stability. Polydiimidazopyridine containing a phosphoric acid group possesses excellent film-forming properties and can be processed to proton conducting membranes that have record high proton conductivity in the temperature range of 20–200 °С after doping with orthophosphoric acid.

Keywords: 2,3,5,6-tetraaminopyridine, heterocyclic polymer, proton conducting polymer membrane, proton conductivity, fuel cell.

УДК 666.3-127+546.41

КОСТНЫЕ ЦЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ
МАГНИЙЗАМЕЩЁННЫХ СУЛЬФАТОВ КАЛЬЦИЯВ. В. Смирнов*, Д. Р. Хайрутдинова, С. В. Смирнов, О. С. Антонова**,
М. А. Гольдберг, член-корреспондент РАН С. М. Баринов

Поступило 12.09.2018 г.

Механохимическим методом синтезированы порошки на основе сульфата кальция с замещением катионов кальция на катионы магния в количестве 10, 20 и 40 мол.%. Проведены исследования фазового состава продуктов синтеза, растворимости и прочности при сжатии полученных цементных материалов, затворенных водой. Показано, что растворимость в физиологическом растворе повышается, а прочность затвердевших цементов снижается по мере увеличения степени замещения. Синтезированные материалы приемлемы для пластики повреждённой костной ткани в хирургии, для получения на их основе композиционных биоматериалов, а также в качестве носителей для систем адресной доставки лекарственных средств в организм человека.

Ключевые слова: костные цементы, сульфат кальция, магнийзамещённый сульфат кальция.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485148-52>

Для заполнения костных дефектов в хирургии используют неорганические цементы на основе соединений кальция, способные к биодеградации (резорбции) в процессе формирования новой костной ткани взамен утраченной [1, 2]. Среди наиболее биорезорбируемых кальцийсодержащих материалов можно выделить биоцементы на основе сульфата кальция (СК), которые нашли коммерческое применение наряду с кальцийфосфатными цементами. Преимуществом СК является низкая стоимость материала и возможность получения цементных растворов с использованием стерильной воды, что значительно упрощает технологию и удешевляет конечный продукт. Вследствие высокой скорости биорезорбции СК-материалы используются при лечении небольших костных дефектов, где процессы регенерации проходят в более короткие сроки. Успешно СК-материалы применяются в композиционных материалах в качестве регулятора процесса биорезорбции, а также в качестве носителей лекарственных средств лечения костных заболеваний [3–7].

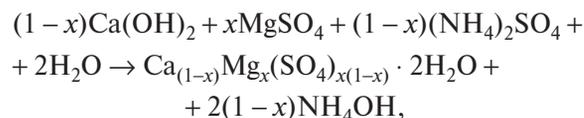
Регулировать свойства цементов на основе кальцийсодержащих соединений можно посредством катионных и анионных замещений. Интересные свойства получены, например, для материалов на основе магнийсодержащих фосфатов кальция [8]. При этом можно отметить важную роль, которую играет

магний в физиологических процессах, происходящих в организме. Однако работы по созданию костных цементов на основе магнийзамещённых СК неизвестны.

В настоящей работе мы синтезировали магнийзамещённые СК со степенью замещения кальция на магний 0, 10, 20 и 40 мол.%, исследовали фазовый состав, растворимость гранул и прочность при сжатии цементных материалов на основе этих СК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Расчётные составы синтезируемых соединений приведены в табл. 1. Синтез проводили механохимическим методом в планетарной мельнице в тефлоновых барабанах в соответствии с предполагаемой реакцией:



где x — степень замещения в мольных долях в диапазоне 0–0,4.

После проведения синтеза полученный порошок сушили в сушильном шкафу при 140 °С в течение 12 ч.

Исследование материалов проводили методами рентгенофазового (РФА) и рентгеноструктурного анализов (дифрактометр Shimadzu XRD6000, “Shimadzu”, Япония) с использованием базы данных JCPDS PCPDFWIN.

*Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова Российской Академии наук, Москва*

*E-mail: smirnov2007@mail.ru

**E-mail: osantonova@yandex.ru

Таблица 1. Состав материалов

Материал	Степень замещения, мол. %	Химическая формула
0% Mg–СК	0	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
10% Mg–СК	10	$\text{Ca}_{0,9}\text{Mg}_{0,1}\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
20% Mg–СК	20	$\text{Ca}_{0,8}\text{Mg}_{0,2}\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
40% Mg–СК	40	$\text{Ca}_{0,6}\text{Mg}_{0,4}\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Определение растворимости осуществляли по изменению массы образцов до и после их выдержки в жидкости. Для этого 1 г порошка, предварительно высушенного до постоянной массы m_1 , помещали в стакан, содержащий 0,9%-й стерильный физиологический раствор для инъекций, и выдерживали в течение 3 сут при 37 °С в термостате. После этого порошок отделяли от жидкости и сушили при 140 °С в течение 12 ч до постоянной массы m_2 . Определяли растворимость по разнице ($m_1 - m_2$), отнесённой к массе раствора (100 г). Массу образцов определяли на аналитических весах с точностью 0,0001 г.

Для испытаний на механическую прочность получали цементные материалы смешением порошка с водой в отношении порошок/жидкость — 2,5/1 по массе. Полученный цементный раствор помещали в тefлоновую форму. После твердения цилиндрические образцы вынимали из формы и через 3 сут измеряли прочность при сжатии. Испытания проводили на образцах диаметром 8 мм и высотой 8 мм с использованием разрывной машины Instron 5155 (“Instron”, Великобритания, скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин). Среднее значение прочности оценивали по результатам испытания выборки из пяти образцов.

Гранулы СК получали смешением синтезированных порошков с водой до получения густого раствора с последующей грануляцией суспензионным методом несмешивающихся жидкостей [1]. В качестве суспендирующей жидкости использовали вазелиновое масло, которое затем удаляли из гранул промывкой их в диметилкетоне. Из полученных гранул была выделена фракция 300–470 мкм просеиванием через капроновые сита.

Согласно данным РФА полученные после синтеза и затем высушенные при 140 °С порошки по фазовому составу состояли из полуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (рис. 1). Дифрактограммы порошков с замещением 0, 10 и 20 мол. % по уширению и интенсивности рефлексов полуводного СК были практически идентичны. Однако при рассмотрении отдельных рефлексов мы наблюдали их смещение в сторону больших значений угла 2Θ для материалов, содержащих магний, по сравнению с 2Θ для 0% Mg–СК. Это свидетельствовало о том, что параметры кристаллической решётки уменьшались при замещении катионов кальция на катионы магния в структуре. В качестве примера на рис. 2 показан отдельный пик дифрактограммы, соответствующий $2\Theta = 25,638^\circ$ [9]. Наибольшее смещение мы наблюдали при замещении 10 мол. %. При больших замещениях 20 и 40 мол. % смещение было меньше. Это можно объяснить изменением строения кристаллической решётки. При небольших концентрациях катионы магния замещают катионы кальция в катионной подрешётке (формирование твёрдых растворов замещения). При больших концентрациях реализуется другой механизм — образование твёрдых растворов внедрения. В случае образования раство-

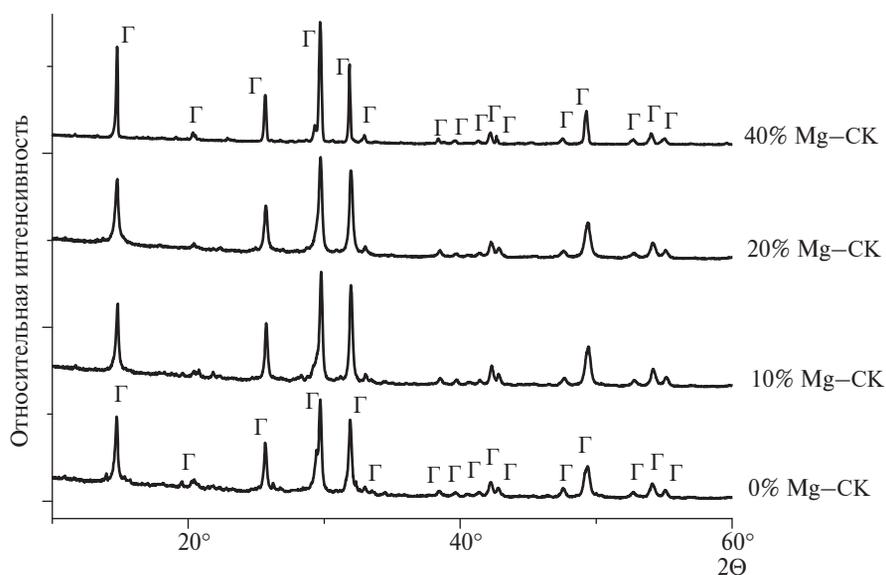


Рис. 1. Дифрактограммы магнийзамещённых материалов (Γ – рефлексы, соответствующие СК полуводному).

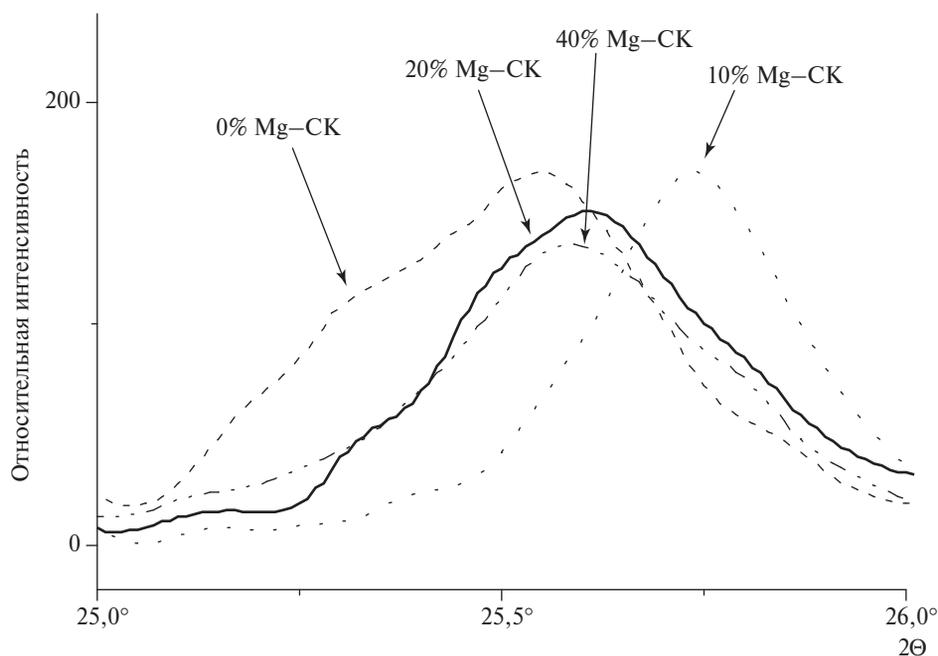


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы магнийзамещённых материалов.

ров замещения кристаллическая решётка уменьшается, так как катион кальция (Ca^{2+} , радиус 0,103 нм [10]) замещается катионом с меньшим радиусом (Mg^{2+} , радиус 0,074 нм [10]). При образовании раствора внедрения имеет место другая тенденция — рост параметров, потому что катион занимает положение в междоузлии катионной подрешётки. Таким образом, введение магния не приводит к образованию новых соединений и не изменяет сингонию кристаллической решётки: при всех концентрациях (0, 10, 20 и 40%) присутствовала только одна фаза — полуводный СК (минерал бассанит). При этом происходило образование твёрдых растворов внедрения и/или замещения в зависимости

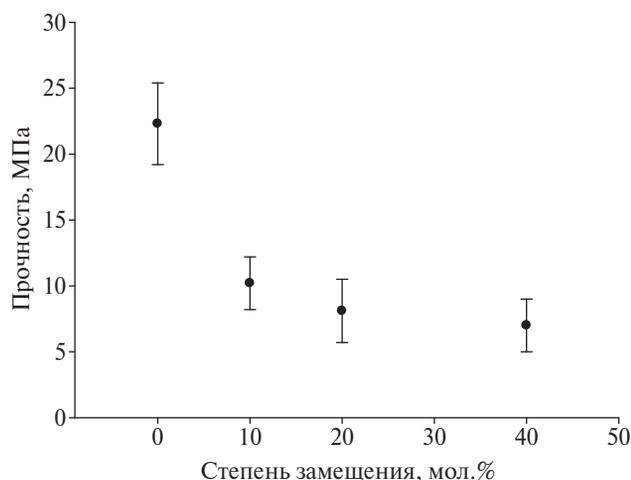


Рис. 3. Прочность магнийзамещённых материалов в зависимости от степени замещения. $M \pm m$, $n = 5$.

от количества катионов магния, замещающих катионы кальция.

Прочность при сжатии снизилась при увеличении степени замещения кальция на магний (рис. 3). Однако прочность цементов даже при замещении 40 мол.% составила около 6–8 МПа, что соответствовало прочности брешитовых цементов, применяемых для остеопластики [1].

Потери массы при растворении гранул из полуводного чистого СК (0% Mg–СК, высушенный при 140 °С) в физиологическом растворе составили 0,37% (табл. 2). Известно, что растворимость СК существенно зависит от температуры раствора и концентрации содержащегося в нём хлорида натрия, а также от температуры прокалывания синтезированных материалов. В работе [11] установлено, что растворимость двуводного СК ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), высушенного при 70 °С, в 10%-м растворе хлорида натрия при 35 °С составляла 0,34%. Растворимость полуводного СК ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), высушенного при 125 °С, в 14%-м растворе хлорида натрия при 25 °С составляла 0,31% [12]. Таким образом, полученные в настоящей работе экспериментальные данные

Таблица 2. Растворимость материалов в зависимости от степени замещения

Материал	Растворимость, г/100 г раствора
0% Mg–СК	0,37
10% Mg–СК	0,41
20% Mg–СК	0,68
40% Mg–СК	0,87

незначительно отличаются от данных литературы. Мы предполагаем, что несущественная разница в результатах связана с условиями подготовки и исследования материалов, а именно температурой сушки синтезированных материалов и температурой выдержки образцов в физиологическом растворе. По мере увеличения замещения катионов кальция на катионы магния растворимость синтезированных материалов плавно повышается от 0,37% (0% Mg–СК) до 0,87% (40% Mg–СК), табл. 2. Это можно объяснить большей растворимостью сульфата магния (35–44 г/100 г H₂O) по сравнению с сульфатом кальция (0,22 г/100 г H₂O [11]). Кроме того, показано [10], что растворимость СК возрастает при добавлении в раствор, содержащий хлорид натрия, дополнительно хлорида магния. Исходя из этого, можно сделать вывод, что введение в СК катионов магния приводит к увеличению его растворимости, что подтвердилось в наших экспериментах. Таким образом, в результате замещения Ca²⁺ на Mg²⁺ были получены новые материалы со структурой сульфата кальция полуводного, характеризующегося большей растворимостью по сравнению с недопированным магнием СК.

В результате проделанной работы нами были созданы новые растворимые цементные материалы на основе сульфата кальция, которые могут найти применение для восстановления костной ткани. Они могут быть также использованы в качестве растворимого компонента в композиционных цементах и в биodeградируемых системах адресной доставки лекарственных средств.

Источник финансирования. Работа поддержана грантом РФФИ 18–03–00429а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баринов С.М., Комлев В.С.* Биокерамика на основе фосфатов кальция. М.: Наука, 2005. 206 с.
2. *Bohner M.* Design of Ceramic-Based Cements and Putties for Bone Graft Substitution // *Eur. Cell Mater.* 2010. V. 20. № 1. P. 3–10.
3. *Alshemary A.Z., Goh Y.-F., Akram M., Razali I.R., Kadir M.R.A., Hussain R.* Microwave Assisted Synthesis of Nano Sized Sulphate Doped Hydroxyapatite // *Materials. Res. Bull.* 2013. V. 48. № 6. P. 2106–2110.
4. *Siek D., Czechowska J., Zima A., Ślósarczyk A.* Biodegradable Cement Type Bone Implant Materials Based on Calcium Phosphates and Calcium Sulphate // *Eng. Biomaterials.* 2015. V. 18. № 133. P. 2–6.
5. *Morley R., Lopez F., Webb F.* Calcium Sulphate as a Drug Delivery System in a Deep Diabetic Foot Infection // *The Foot.* 2016. V. 27. P. 36–40.
6. *Kutkut A., Andreana S., Kim H.L., Monaco E., Jr.* Extraction Socket Preservation Graft before Implant Placement with Calcium Sulfate Hemihydrate and Platelet-Rich Plasma: a Clinical and Histomorphometric Study in Humans // *J. Periodontol.* 2012. V. 83. № 4. P. 401–409.
7. *Leonardis D., Pecora G.* Prospective Study on the Augmentation of the Maxillary Sinus with Calcium Sulfate: Histological Results // *J. Periodontol.* 2000. 71. V. 6. P. 940–947.
8. *Баринов С.М.* Керамические и композиционные материалы на основе фосфатов кальция для медицины // *Успехи химии.* 2010. Т. 71. С. 15–32.
9. *Ballirano P., Maras A., Meloni S., Caminiti R.* The Monoclinic I 2 Structure of Bassanite, Calcium Sulphate Hemihydrate (CaSO₄ · 0,5H₂O) // *Eur. J. Mineral.* 2001. V. 13. № 5. P. 985–993.
10. *Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П.* Свойства неорганических соединений: Справочник. Л.: Химия, 1983. 392 с.
11. *Kumar A., Shukla J., Dangar Y., Mohandas V.P.* Effect of MgCl₂ on the Solubility of CaSO₄ · 2H₂O in the Aqueous NaCl System and Physicochemical Solution Properties at 35 C // *J. Chem. & Eng. Data.* 2010. V. 55. № 4. P. 1675–1678.
12. *Marshall W.L., Slusher R., Jones E.V.* Aqueous Systems at High Temperatures XIV. Solubility and Thermodynamic Relationships for CaSO₄ in NaCl–H₂O Solutions from 40 to 200 C, 0 to 4 Molar NaCl // *J. Chem. & Eng. Data.* 1964. V. 9. № 2. P. 187–191.

BONE CEMENTS BASED ON MAGNESIUM-SUBSTITUTED CALCIUM SULFATES

**V. V. Smirnov, D. R. Khayrutdinova, S. V. Smirnov, O. S. Antonova, M. A. Goldberg,
Corresponding Member of the RAS S. M. Barinov**

Received September 12, 2018

New materials based on calcium sulphate with the replacement of calcium cations to magnesium cations — 10, 20 and 40 mol.% were obtained. The synthesis of substituted forms of calcium sulphate, the study of the phase composition, and the strength of the obtained materials were carried out in the work. It is shown that the solubility of the synthesized materials increases with increasing of the degree of substitution. The obtained materials are acceptable for the preparation of composite biomaterials on their basis for the regeneration of bone tissue and carriers of drugs.

Keywords: bone cements, calcium sulphate, magnesium substituted calcium sulphate.

УДК 544.77

**УПРАВЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЕЙ ПОЛИМЕРНОГО
ФОТОАКТИВНОГО СЛОЯ В ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ:
МЕЗОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ****П. В. Комаров^{1,2,*}, П. О. Бабуркин², В. А. Иванов³,
Шоу-Ан Чен (Show-An Chen)⁴, академик РАН А. Р. Хохлов^{3,1}**

Поступило 04.10.2018 г.

Описана концепция получения хорошо организованных токопроводящих путей в смесях СП/НЧ в фотovoltaических (ФВ) устройствах. Предполагается, что для достижения поставленной цели можно использовать свойство АВ диблок-сополимеров, заключающееся в том, что в зависимости от химического строения А и В блоков и соотношения их длин в ходе микрофазного разделения в объёме материала происходит формирование термодинамически устойчивых доменов с кубической симметрией, имеющих трёхмерную периодичность в пространстве. С использованием техники мезомасштабного моделирования нам удалось показать, что путём подбора типа поверхностного модификатора НЧ (управляющего совместимостью НЧ с полимерной матрицей), химической структуры блоков сопряжённого сополимера и их длины можно управлять морфологией фотоактивного слоя ФВ-устройств.

Ключевые слова: солнечные элементы, сопряжённые сополимеры, неорганические полупроводниковые наночастицы, мезомасштабное моделирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485153-57>

В настоящее время в качестве перспективных материалов для производства фотоактивного слоя ячеек фотovoltaических (ФВ) элементов солнечных батарей и светодиодов рассматриваются гибридные наноконпозиты на основе органических сопряжённых сополимеров (СП) и неорганических наночастиц (НЧ), приготовленных в форме смеси или послойного гетероперехода [1]. Посредством изменения свойств НЧ можно управлять квантовым выходом люминесценции, коэффициентом экстинкции, а также спектром поглощения вещества в области видимого и инфракрасного излучения [2, 3]. Однако ФВ-ячейки на основе гибридных наноконпозитов обладают низкой эффективностью [4, 5]. Предполагается, что для улучшения их характеристик необходимо получить фотоактивный слой с хорошей проводимостью.

Целью данной работы является разработка способов получения хорошо организованных токопроводящих путей в смесях СП/НЧ в ФВ-устройствах. Для достижения поставленной цели можно использовать свойство АВ диблок-сополимеров, заключа-

ющееся в том, что в зависимости от химического строения А и В блоков и соотношения их длин в ходе микрофазного разделения в объёме материала происходит формирование термодинамически устойчивых доменов с кубической симметрией типа примитивной или двойной гироидной G, имеющих трёхмерную периодичность в пространстве [6]. Следовательно, ФВ-ячейка, в которой в силу микрофазного разделения образуются такие структуры, будет обладать хорошо организованной перколяционной сетью токопроводящих путей, что должно положительно сказываться на эффективности ФВ-устройств.

Описанные выше соображения мы положили в основу теоретической модели полимерного фотоактивного слоя на основе СП (представляющего собой линейный АВ диблок-сополимер) и модифицированных наночастиц. Моделирование фазового поведения смеси было выполнено с использованием мезомасштабной техники моделирования на основе метода диссипативной динамики частиц (ДДЧ) [7], неоднократно использованной нами ранее [8, 9]. В этом подходе реальной системе сопоставляется огрублённая (крупнозернистая) модель, включающая в себя одинаковые сферические частицы единичного диаметра ($\sigma = 1$) и массы ($m = 1$), называемые бидами. Их эволюция подчиняется системе уравнений Ньютона. Частицы взаимодействуют посредством короткодействующих отталкивающих

¹ Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской Академии наук, Москва

² Тверской государственный университет

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

⁴ National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan

*E-mail: pv_komarov@mail.ru

консервативных сил, амплитуда которых пропорциональна параметрам Флори—Хаггинса $\chi_{\alpha\beta}$ [7]. Кроме того, на них дополнительно действуют диссипативная и стохастическая силы, обеспечивающие термостатирование системы и учёт гидродинамических взаимодействий. В случае моделирования молекул между частицами дополнительно вводятся ковалентные связи, деформация которых описывается законом Гука.

Выбор метода ДДЧ определяется характерными масштабами НЧ, используемых в ФВ-устройствах. Для обеспечения высокой эффективности преобразования энергии фотонов в электрическую (высвобождение пары электрон—дырка) используют НЧ диаметра $\sim 2,8\text{--}7,5$ нм [10]. Нижнее значение для диаметра НЧ примерно равно двум сегментам Куна в случае СП поли-(3-гексилтиофен-2,5-диила) (РЗНТ), что можно выбрать в качестве единицы длины σ . Это означает, что один бид равен одной НЧ и примерно восьми мономерам РЗНТ.

Крупнозернистая модель смеси СП/НЧ включает в себя три типа бидов — С, S и P, сопоставляемых соответственно мономерам диблок-сополимера и НЧ. Для простоты полагаем, что один из блоков полимерной цепи (образованный бидами С) хорошо совместим с НЧ типа P. Структура полимерной цепи определяется формулой $C_{N-n}S_n$, где N — длина цепи, n — длина блока, несовместимого с НЧ. Для определения взаимодействия в системе в качестве реального прототипа бидов типа С мы выбрали мономеры РЗНТ. В качестве прототипа бидов типа S по нашему предположению могут быть использованы мономеры тиофена, модифицированные боковыми цепями иной природы, чем в РЗНТ. Посредством варьирования n можно подобрать модель фотоактивного слоя, в котором НЧ и блоки сополимера образуют домены с кубической симметрией. Поскольку структура материала может зависеть от концентрации НЧ, в качестве второго параметра модели мы выбрали отношение весовых долей $w_{\text{pol}} : w_{\text{np}}$ полимера и НЧ. Для простоты весовая доля полимера была фиксирована $w_{\text{pol}} = 1$.

Значения параметров Флори—Хаггинса для параметризации консервативных сил были выбраны исходя из их взаимосвязи с параметрами растворимости Гильдебранда δ [11] хорошо известным соотношением $\xi_{\alpha\beta} = v(\delta_\alpha - \delta_\beta)^2 / (RT)$ (R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура, v — средний молекулярный объём, сопоставляемый одному биду) [9]. Наночастицы, используемые в полимерных фотоактивных слоях, покрываются поверхностным модификатором для облегчения ма-

нипулирования ими в процессе приготовления фотоактивного слоя. Таким образом, соответствующим выбором типа поверхностного модификатора можно сильно влиять на взаимодействие НЧ с полимерной матрицей. Например, для модификации НЧ PbS используются следующие тиолсодержащие лиганды: гексан-1-тиол, 2-этилгексан-1-тиол, 6-фенилгексан-1-тиол и др. [12]. С помощью метода Аскадского [13] для лигандов можно получить следующий диапазон значений параметра растворимости: $\delta = 17,0\text{--}18,2$ (Дж/см³)^{1/2}. В этот диапазон попадает значение параметра растворимости 17,3 (Дж/см³)^{1/2}, вычисленное для РЗНТ. Таким образом, можно положить, что $\chi_{C,P} = 0$. Для остальных подсистем мы использовали $\chi_{C,S} = \chi_{S,P} = 1$, чтобы обеспечить несовместимость, во-первых, между блоками сополимера и, во-вторых, между блоками, образованными бидами типа S, и наночастицами.

Модель фотоактивного слоя была построена из цепей диблок-сополимера ($C_{N-n}S_n$) и НЧ типа P. В расчётах длина цепи сополимера была фиксирована $N = 20$, а значение n варьировалось в диапазоне от 3 до 10. Для отношения весовой доли полимера и НЧ ($w_{\text{pol}} : w_{\text{np}}$) были выбраны значения 1 : 0, 1 : 10, 1 : 25 и 1 : 30. Начальные состояния модели смеси СП/НЧ генерировались случайным образом в кубических ячейках с длиной ребра $L = 24\sigma$ и 30σ для выяснения зависимости типов возникающих структур от объёма системы. Для устранения влияния возможных особенностей начального состояния мы провели по три серии независимых расчётов.

Для каждого набора параметров в ячейке моделирования происходит достаточно быстрое фазовое разделение блоков полимерной цепи. При этом НЧ формируют кластеры внутри фазы, образованной блоками из бидов типа С. Такое поведение объясняется большим значением произведения $N\chi_{CS} = 20$, отвечающего режиму сильной сегрегации блоков. Общее время релаксации каждой из систем было выбрано равным 10^6 шагов интегрирования уравнений движения, что достаточно для возникновения и стабилизации объёмно упорядоченных фаз. Последующие $2 \cdot 10^6$ шагов интегрирования использовали для вычисления структурных характеристик построенных образцов.

В конечном состоянии для всех систем с $n > 5$ и части систем с $n = 5$ наблюдается хорошо выраженное негомогенное распределение бидов. Это иллюстрирует рис. 1, на котором построена диаграмма состояний в координатах n и w_{np} на основе выполненной идентификации типов конечных структур, возникающих в ячейке моделирования

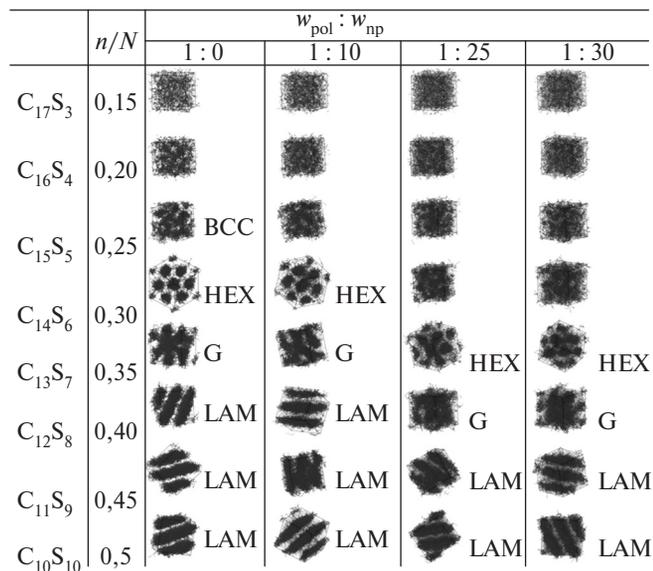


Рис. 1. Диаграмма состояний для смеси сопряжённого диблок-сополимера $C_{20-n}S_n$ с НЧ в ячейке с длиной ребра 24σ . Аббревиатуры соответствуют следующим идентифицированным морфологиям: BCC — объёмно-центрированная кубическая, HEX — гексагонально упакованные цилиндры, G — гироидная, LAM — ламеллярная.

с $L = 24\sigma$. На рисунке приводятся примеры распределения частиц типа S, несовместимых с НЧ. Наши расчёты не выявили для рассмотренного диапазона параметров зависимости конечных структур от размера ячейки моделирования. Для случая $w_{\text{np}} = 0$ положение возникающих типов структур согласуется с фазовой диаграммой диблок-сополимеров [6]. Как видно из рисунка, при $n = 7$ и $w_{\text{np}} = 0$ блоки C и S формируют взаимопроникающую сетчатую структуру, морфология которой относится к типу двойного гироида. При увеличении доли НЧ в системе, $w_{\text{np}} > 10$, положение гироидной фазы смещается в область большего значения n .

Следует отметить, что для идентификации возникающих морфологий были рассчитаны структурные факторы систем, которые сравнивались с рефлексами, характерными для структур с кубической симметрией (рис. 2), как это было сделано в работе [8]. Из выявленных кубических морфологий в нашей модели возникает гироидная структура в случае цепей $C_{13}S_7$ (при $w_{\text{np}} \leq 10$) и $C_{12}S_8$ (при $w_{\text{np}} > 10$). При этом для $C_{12}S_8$, когда $w_{\text{np}} > 10$, НЧ совместно с C-блоками образуют перколирующую структуру (рис. 1, 3) в силу хорошей совместимости

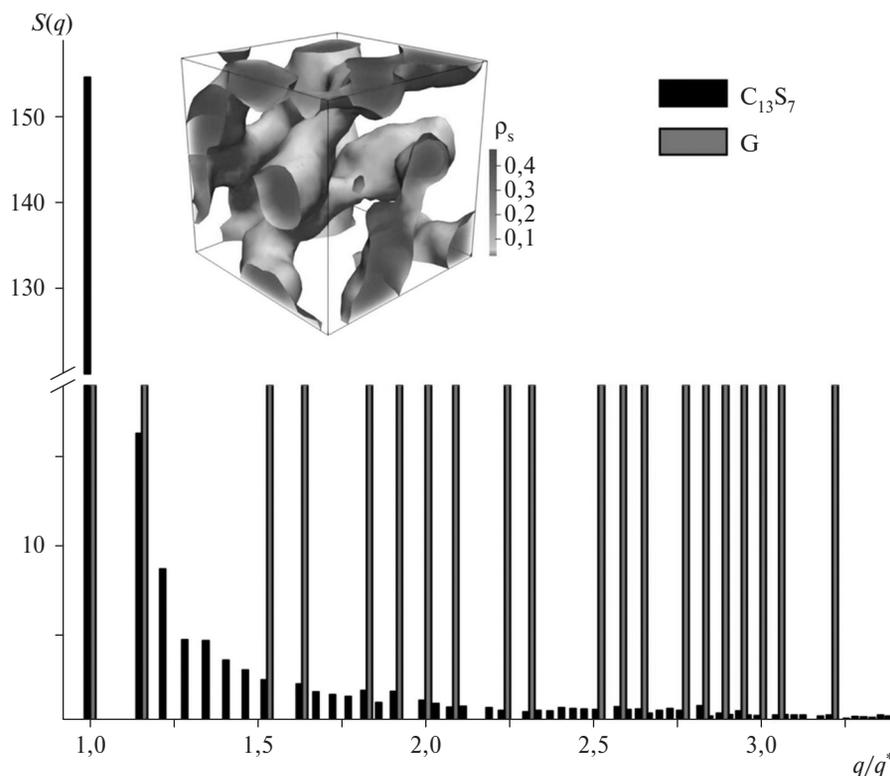


Рис. 2. Пример частичного структурного фактора $S(q) = \langle S_S(\mathbf{q}) \rangle_{|\mathbf{q}|=q}$ как функции q/q^* , где q^* — положение первого, наиболее интенсивного максимума (для $C_{13}S_7$, $w_{\text{np}} = 0$). Вертикальные линии показаны при каждом значении модуля вектора $|\mathbf{q}| = \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$, где h, k и l — индексы Миллера. Результаты ДДЧ-расчётов (чёрные линии) сопоставляются с гармониками G-фазы, показанными в виде более светлых (красных) линий одинаковой высоты. На врезке показан пример распределения плотности $\rho_s > 0,5$ бидов типа S.

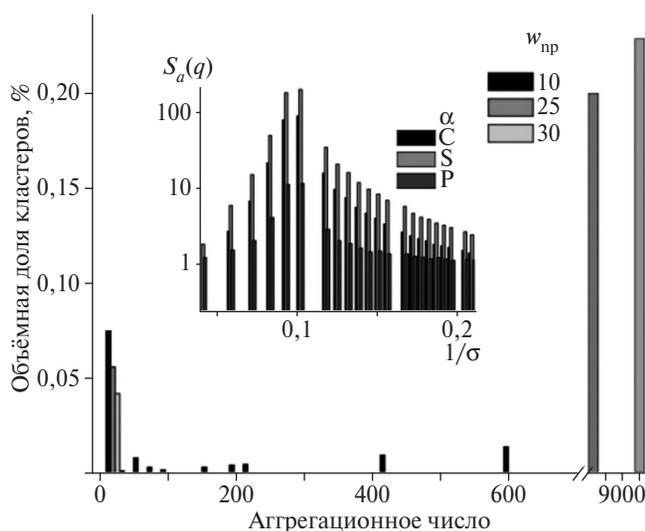


Рис. 3. Объёмная доля бидов типа Р (НЧ) в составе кластеров с определённым числом частиц (агрегационное число) для трёх систем, имеющих морфологию гироида: $C_{13}S_7$ ($w_{пр} = 10$), $C_{12}S_8$ ($w_{пр} = 25$ и 30). Расчёты выполнены с использованием алгоритма из работы [9]. На врезке показаны парциальные структурные факторы $S(q)$ для подсистем С, S и Р в случае системы с $C_{12}S_8$ и $w_{пр} = 30$.

бидов этих подсистем. Таким образом, в ячейке моделирования образуется биконтинуальная морфология. Как было уже отмечено выше, наличие перколирующих фаз для СП и НЧ является наиболее предпочтительным фактором для получения полимерного фотоактивного слоя с хорошей проводимостью для носителей зарядов. На основе данных рис. 3 можно также заключить, что сдвиг гироидной фазы в область больших n можно объяснить эффективным возрастанием длины С-блока цепи СП в результате внедрения НЧ в фазу, образуемую этими блоками.

Таким образом, с использованием техники мезомасштабного моделирования нам удалось показать, что путём подбора типа поверхностного модификатора НЧ (управляющего совместимостью НЧ с полимерной матрицей), химической структуры блоков сопряжённого сополимера и их длины можно управлять морфологией фотоактивного слоя ФВ-устройств. Значения n и $w_{пр}$, при которых возникают домены с кубической симметрией и перколяцией для НЧ, могут служить ориентиром для оптимизации экспериментального поиска способа получения фотоактивного слоя с оптимальной сетью электропро-

водящих путей, необходимых для создания высокоэффективных ФВ-устройств.

Источники финансирования. Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова [14] при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17–53–52009) и Министерства науки и технологий Тайваня (проект MOST 106-2923-E007-001-MY3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu L., Zheng T., Wu Q., Schneider A.M., Zhao D., Yu L. // Chem. Rev. 2015. V. 115. № 23. P. 12666–12731.
2. Tvrđy K., Frantsuzov P.A., Kamat P.V. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2011. V. 108. № 1. P. 29–34.
3. Ren S., Chang L.-Y., Lim S.-K., Zhao J., Smith M., Zhao N., Bulovi V., Bawendi M., Gradecak S. // Nano Lett. 2011. V. 11. № 11. P. 3998–4002.
4. Lee C.W., Chou C.H., Huang J.H., Hsu C.S., Nguyen T.P. // Mater. Sci. Eng. B. 2008. V. 147. № 2/3. P. 307–311.
5. Saunders B.R. // J. Colloid and Interface Sci. 2012. V. 369. P. 1–15.
6. Matsen M.W., Griffiths G.H., Wickham R.A., Vassiliev O.N. // J. Chem. Phys. 2006. V. 124. № 2. P. 024904–9.
7. Groot R.D., Warren P.B. // J. Chem. Phys. 1997. V. 107. № 11. P. 4423–4435.
8. Komarov P.V., Veselov I.N., Khalatur P.G. // Chem. Phys. Lett. 2014. V. 605/606. P. 22–27.
9. Markina A.A., Ivanov V.A., Komarov P.V., Khokhlov A.R., Tung S.-H. // J. Phys. Chem. B. 2017. V. 121. № 33. P. 7878–7888.
10. Giansante C., Carbone L., Giannini C., Altamura D., Ameer Z., Maruccio G., Loiudice A., Belviso M.R., Cozzoli P.D., Rizzo A., Gigli G. // J. Phys. Chem. C. 2013. V. 117. № 25. P. 13305–13317.
11. Hildebrand J.J.H., Scott R.L. The Solubility of Non-Electrolytes. N.Y.: Reinhold, 1949.
12. Greaney M.J., Brutchey R.L. // Materials Today. 2015. V. 18. № 1. P. 31–38.
13. Askadskii A.A. Computational Materials Science of Polymers. Cambridge: Cambridge Intern. Sci. Publ., 2001.
14. Sadovnichy V., Tikhonravov A., Voevodin V., Opanasenko V. In: Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale. L.: Chapman & Hall/CRC, 2013. P. 283–307.

CONTROLLING MORPHOLOGY OF POLYMER PHOTOACTIVE LAYER IN PHOTOVOLTAIC ELEMENTS: MESOSCOPIC SIMULATION

P. V. Komarov, P. O. Baburkin, V. A. Ivanov, Show-An Chen,

Academician of the RAS A. R. Khokhlov

Received October 4, 2018

A concept of fabrication of well-organized conductive pathways in CP/NP blends in photovoltaic devices. It is assumed that to succeed in this task, one can use the property of AB diblock copolymers that, depending on the chemical structure of A and B blocks and the ratio between their lengths, these copolymers undergo microphase separation in bulk to form thermodynamically stable domains of cubic symmetry with 3D periodicity. Using a mesoscale simulation technique, we demonstrated that the morphology of the photoactive layer of photovoltaic devices can be controlled by selecting the surface NP modifier (responsible for the compatibility of NPs with the polymeric matrix), the chemical structure of the blocks of a conjugated copolymer, and their length.

Keywords: solar cells, conjugated copolymers, inorganic semiconducting nanoparticles, mesoscale simulations.

УДК.551.24:552.3

ИЗОТОПНЫЙ Sr–Nd–Pb–Hf-СОСТАВ ПОЗДНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ГРАНИТОИДОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧУКОТКИ

М. В. Лучицкая^{1,*}, Б. В. Беляцкий², Е. А. Белоусова³, Л. М. Натапов³

Представлено академиком РАН Ю.М. Пушаровским 08.11.2016 г.

Поступило 03.10.2016 г.

Представлены результаты изучения изотопного состава позднепалеозойских Sr–Nd–Pb–Hf-гранитоидов Центральной Чукотки на примере Киберовского, Куэкувуньского массивов. Возраст гранитоидов этих массивов и гранитов из гальки конгломератов в основании перекрывающих нижнекаменноугольных отложений 351–363 млн лет (U–Pb-циркон, ТИМС, ВИМС, ЛА-ИСП-МС). Таким образом, гранитоидный магматизм соответствует по времени проявления тектоническим событиям элсмирской орогении в Арктическом регионе. Изотопный Sr–Nd–Pb–Hf-состав гранитоидов свидетельствует об участии мантийного и корового компонентов в формировании источника гранитных расплавов. Образование гранитоидов, вероятно, происходило в геодинамической обстановке континентальной окраины андийского типа при взаимодействии мантийных расплавов, образующихся при плавлении мантийного клина в надсубдукционных условиях, с континентальной корой.

Ключевые слова: Sr–Nd–Pb-изотопный состав, Lu–Hf-анализ, циркон, гранитоиды, Чукотка, Киберовский и Куэкувуньский массивы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485158-62>

Исследование петро-геохимического и изотопного Sr–Nd–Pb-состава гранитоидов и Lu–Hf-анализ содержащихся в них цирконов позволяют прояснить петрогенезис пород, установить геохимические характеристики источников гранитоидных магм, проследить главные события в их магматической эволюции и оценить степень мантийно-корового взаимодействия при их образовании. Данные об изотопном Sr–Nd–Pb-составе гранитоидов Чукотских мезозоид очень фрагментарны и касаются преимущественно мезозойских редкометалльных гранитоидов [1, 2]. Для позднепалеозойских гранитоидов возраст надёжно обоснован U–Pb-датировками цирконов (ВИМС, ТИМС) [3, 4]; впервые изучен изотопный Sr–Nd–Pb-состав и проведён Lu–Hf-анализ цирконов, результаты которых представлены в нашей работе.

В пределах Центральной Чукотки позднепалеозойские гранитоиды слагают Киберовский и Куэкувуньский массивы, приуроченные к центральным частям соответственно Куульского и Куэкувуньского поднятий Анюйско-Чукотской складчатой системы (рис. 1), в которых вскрыты образования палеозой-

ского чехла Чукотского микроконтинента. Гранитоиды Киберовского массива прорывают терригенные и карбонатно-терригенные породы девона, и их галька присутствует в конгломератах в основании нижнекаменноугольных терригенно-карбонатных отложений. Киберовский массив сложен преимущественно биотитовыми гранитами, гранодиоритами, переходы между которыми постепенные; в меньшей степени присутствуют лейкограниты, аляскиты, субщелочные граниты. Гранитоиды Куэкувуньского массива прорывают осадочные и метаморфические комплексы девона–карбона и превращены в очковые гнейсы или гранито-гнейсы, которые по химическому составу соответствуют кварцевым монцодиоритам, сиенитам, гранодиоритам, гранитам, лейкогранитам.

На основании геохронологических исследований гранитоидов Киберовского, Куэкувуньского массивов, а также гранитоидов из гальки конгломератов в основании каменноугольных отложений был установлен их раннекаменноугольный возраст 352–359 млн лет (U–Pb-циркон, ТИМС, ВИМС [3, 5]), соответствующий проявлениям тектонических событий элсмирской орогении в Арктическом регионе.

Петрографический состав и петро-геохимические характеристики гранитоидов Киберовского, Куэкувуньского массивов и гранитов из гальки указывают на их принадлежность к гранитам I-типа, включая и их высокодифференцированные разности [3].

¹ Геологический институт

Российской Академии наук, Москва

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

³ GEMOC ARC National Key Centre, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia

*E-mail: luchitskaya@ginras.ru

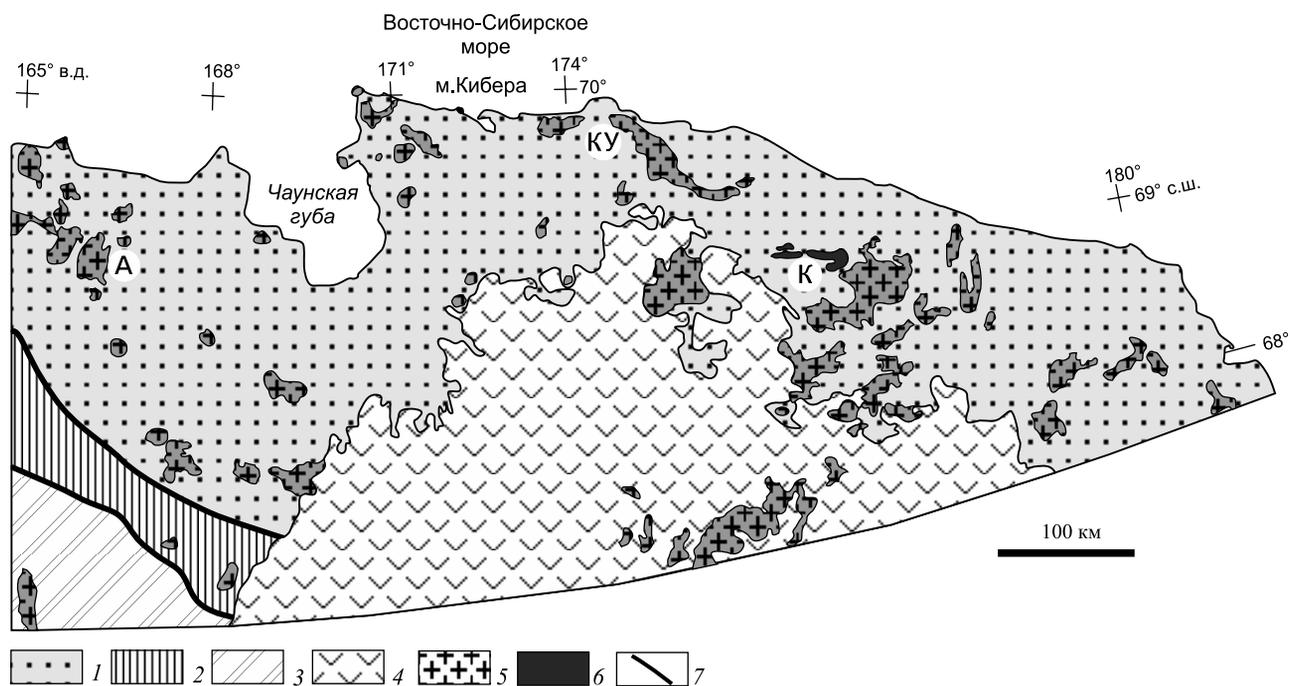


Рис. 1. Схема геологического строения Центральной Чукотки ([10] с изменениями). 1 — Анойско-Чукотская складчатая система; 2 — Южно-Анойская сутурная зона; 3 — Алазейско-Олойская складчатая система; 4 — Охотско-Чукотский вулканический пояс; 5, 6 — гранитоиды: 5 — меловые; 6 — позднепалеозойские; 7 — разрывные нарушения. Буквы — поднятия: А — Алярмаутское, КУ — Куульское, К — Куэквуньское.

Изотопный состав Sr, Nd, Pb-гранитоидов был определён в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. С.-Петербург) на термоионизационном масс-спектрометре TRITON (ТИМС) по методике, описанной в [6]. Изучение изотопной Lu–Hf-системы цирконов было проведено в Центре GEMOC Университета Макуори (Сидней) *in situ* с помощью ультрафиолетового лазера New Wave UP 213 nm, совмещённого с мультиколлекторным масс-спектрометром с индуктивно-связанной плазмой Nu Plasma (ИСП-МС). Описание технических деталей, методических приёмов и констант, используемых для вычислений ϵHf и модельных возрастов (T_{DM}^{C}), приведено в [7].

Начальное $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в изученных гранитоидах 0,512037–0,512134, а $\epsilon\text{Nd}(T)$ от –0,95 до –2,83 (рис. 2а). Модельные одностадийные, двустадийные возрасты гранитоидов обоих массивов и гранитов из гальки достаточно близки и соответствуют интервалам 1034–1148, 1203–1300 млн лет мезопротерозоя. Исключение составляют аляскинты Киберовского массива, которые имеют более древний палеопротерозойский одностадийный возраст (2218 млн лет) и несколько более древний, чем в остальных гранитоидах, мезопротерозойский двухстадийный возраст (1361 млн лет).

Гранитоиды обоих массивов имеют сравнительно высокие величины начального $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0,705889

до 0,707845 (рис. 2б). Минимальные значения характерны для монцонитов из включений в гранитах Киберовского массива, максимальные — для гранодиоритов того же массива. Граниты из гальки резко выделяются нереально низкими величинами начального $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,695045), что определяется завышенным Rb/Sr за счёт избытка Rb или общей диспропорции Rb, Sr вследствие позднего выветривания слюды и подвижности Rb–Sr-системы в гипергенных условиях.

Изотопный состав Pb в гранитоидах Киберовского массива варьирует в широких пределах: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,8615–20,1301$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,6015–15,7134$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38,4355–39,3947$. Разброс этих отношений для гранитоидов Куэквуньского массива менее значительный: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 19,0710–19,4393$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,6105–15,6425$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 39,5055–40,1312$. А наименее радиогенный состав Pb имеют граниты из гальки: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,6909$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,6157$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38,7637$.

В координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 2в) фигуративные точки изотопного состава Pb гранитоидов Киберовского, Куэквуньского массивов и гранитов из гальки, пересчитанного на возраст образования (350 млн лет назад), расположены на линии модельной эволюции изотопного состава Pb в орогене, за исключением образца монцонита из включения в гранитах Киберовского массива,

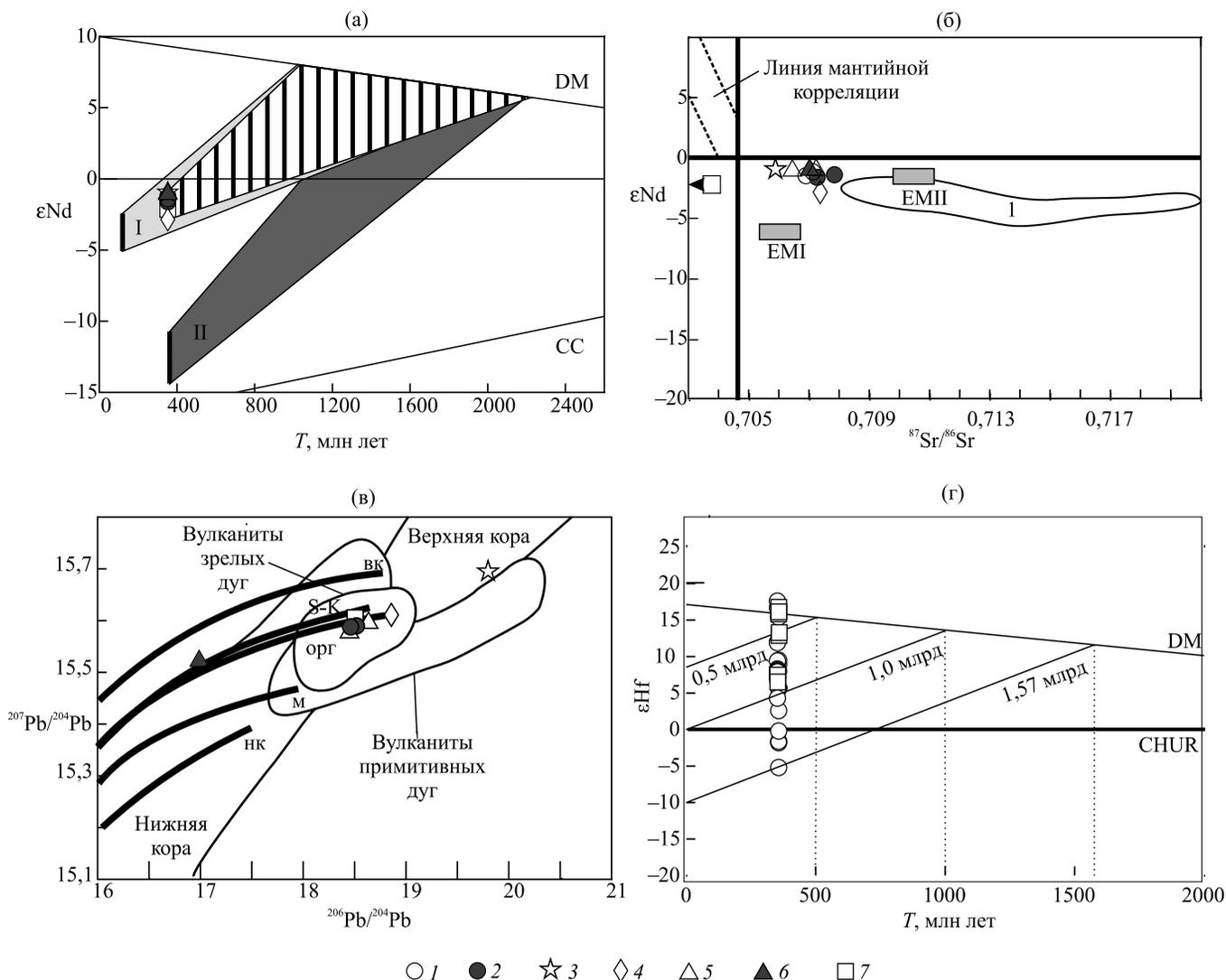


Рис. 2. Диаграммы $\epsilon\text{Nd}(T)$ —время (а), $\epsilon\text{Nd}(T)$ — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (б), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (в), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (г), и ϵHf —время для гранитоидов Киберовского, Куэвкуньского массивов, гранитов из гальки конгломератов в основании нижнекаменноугольных отложений. DM — деплетированная мантия; CC — континентальная кора; EM I, EM II — модельные мантийные компоненты: EM I — обогащённая мантия с высоким Rb/Sr, EM II — обогащённая мантия с высоким Nd/Sm. Линии на (в) соответствуют эволюции изотопного состава Pb в различных модельных резервуарах: ВК — верхней континентальной коре, ОРГ — орогене, М — истощённой мантии, НК — нижней континентальной коре. Поля модельных источников: ниже- и верхнекоровых, зрелых и примитивных островных дуг. I — поле гранитоидов Алярмаутского поднятия, II — поле позднепалеозойских гранитоидов территории Юкон-Танана. 1–4 — гранитоиды Киберовского массива: 1 — гранит, 2 — гранодиорит, 3 — монцитонит из включения, 4 — аляскит; 5, 6 — гранитоиды Куэвкуньского массива: 5 — гранодиорит, 6 — кварцевый монцитонит; 7 — гранит из гальки.

точка состава которого находится между линиями эволюции изотопного состава Pb орогена и верхней коры. Такое расположение точек изотопного состава проанализированных образцов гранитоидов может свидетельствовать о смешении мантийного и корового материала при образовании источника гранитных магм. При сравнении в тех же координатах положения полей ниже- и верхнекоровых модельных источников, а также зрелых и примитивных островных дуг видно, что точки изотопных составов Pb гранитоидов обоих массивов и гранитов из гальки

сосредоточены преимущественно в поле пород зрелых островных дуг (рис. 2в).

Анализ изотопной Lu—Hf-системы цирконов из гранитов Киберовского массива выявил широкий разброс величин $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ и $\epsilon\text{Hf} = 0,282721$ – $0,283418$ от +16,7 до –5,2 для гранитов Киберовского массива. Интервалы этих величин для циркона из гранитов гальки несколько меньше: $0,282415$ – $0,283683$, а ϵHf имеет только положительные значения: от +16,7 до +6,5. Одностадийные модельные Hf-возрасты для гранитов Киберовского массива

и гальки обнаруживают практически одинаковый разброс, а сам модельный возраст совпадает с возрастом гранитов: 300–740 и до 720 млн лет соответственно. Однако максимальные двухстадийные модельные возрасты (T_{DM}^C) различаются: 1,57 и 0,88 млрд лет соответственно. Большая часть фигуративных точек проанализированных цирконов на диаграмме ϵHf —возраст расположена между линиями эволюции мантии хондритового состава — CHUR ($\epsilon Hf = 0$) и обеднённой — DM (рис. 2г), что указывает на присутствие материала мантийного происхождения при формировании источника гранитных расплавов. Отрицательные величины ϵHf , характерные только для цирконов из гранитов Киберовского массива, указывают на участие древнего (не древнее мезопротерозойского) корового материала в субстрате, при плавлении которого сформировались гранитные магмы.

Таким образом, представленные данные об изотопном Sr–Nd–Pb–Hf-составе гранитоидов Киберовского, Куэвуньского массивов и гранитов из гальки свидетельствуют об участии мантийного и корового компонентов в формировании источника гранитных расплавов, на что указывают небольшие отрицательные величины $\epsilon Nd(T)$, промежуточные между гранитами I- и S-типа величины начального $^{87}Sr/^{86}Sr$, широкие вариации значений отношений изотопов Pb и ϵHf в цирконах гранитоидов. Одно- и двухстадийные Nd- и Hf-модельные возрасты гранитоидов предполагают мезопротерозойский—палеопротерозойский возраст корового протолита. Мезопротерозойские унаследованные цирконы присутствуют в неопротерозойских гранитоидах метаморфического фундамента, который обнажается на о. Врангеля [8].

Совокупность петрографических, петро-геохимических и изотопных данных позволяет предполагать, что формирование гранитоидов происходило в геодинамической обстановке континентальной окраины андийского типа при взаимодействии мантийного вещества, образующегося при плавлении мантийного клина в надсубдукционных условиях, с континентальной корой. Полученные результаты и представленная интерпретация хорошо согласуются с реконструкцией окраинно-континентальной магматической дуги позднедевонского—раннекаменноугольного возраста на южной окраине докембрийского блока Беннет-Барровия или Арктида (фундамента микроконтинента Чукотка—Арктическая Аляска), коллизия которого с окраиной Северо-

Американского кратона в позднем силуре—раннем девоне привела к элсмирскому орогенезу в Северной Аляске и Канадских Арктических о-вах [9].

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17–05–00795).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефремов С.В.* Редкометальные гранитоиды Чукотки. Геохимия, источники вещества, модели образования: Автореф. дис. д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск, 2012. 40 с.
2. *Алексеев В.И.* Литий-фтористые граниты Дальнего Востока. СПб., 2014. 244 с.
3. *Луцицкая М.В., Соколов С.Д., Котов А.Б., Натанов Л.М., Белоусова Е.А., Катков С.М.* Позднепалеозойские гранитоиды Чукотки: особенности состава, обоснование возраста и положение в структуре арктического региона России // Геотектоника. 2015. № 4. С. 3–29.
4. *Lane L.S., Cecile M.P., Gehrels G.E., Kos'ko M.K., Layer P.W., Parrish R.R.* Devonian-Carboniferous Paleogeography and Orogenesis, Northern Yukon and Adjacent Arctic Alaska // *Canad. J. Earth Sci.* 2015. V. 52. P. 147–160.
5. *Катков С.М., Луцицкая М.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З.* О возрасте гранитных интрузий Анюйско-Чукотской складчатой системы // ДАН. 2013. Т. 450. № 2. С. 193–198.
6. *Суцевская Н.М., Мигдисова Н.А., Антонов А.В., Крымский Р.Ш., Беляцкий Б.В., Кузьмин Д.В., Бычкова Я.В.* Геохимические особенности лампроитовых лав четвертичного вулкана Гауссберг (Восточная Антрактида) — результат влияния мантийного плюма Кергелен // Геохимия. 2014. № 12. С. 1079–1098.
7. *Кузнецов Н.Б., Натанов Л.М., Белоусова Е.А., О'Рейли С.* Первые результаты изотопного анализа детритных цирконов поднятия Енганэ-Пэ (Полярный Урал): попытка определения палеотектонической позиции протоуралид-тиманид // ДАН. 2009. Т. 426. № 4. С. 504–510.
8. *Луцицкая М.В., Сергеев С.А., Соколов С.Д., Тучкова М.И.* Неопротерозойские гранитоиды острова Врангеля // ДАН. 2016. Т. 469. № 2. С. 195–198.
9. *Natal'in V., Amato J.M., Toro J., Wright J.E.* Paleozoic Rocks of Northern Chukotka Peninsula, Russian Far East: Implications for the Tectonic of Arctic Region // *Tectonics.* 1999. V. 18. № 4. P. 977–1003.
10. *Тиболов И.В., Черепанова И.Ю.* Геология севера Чукотки — современное состояние и проблемы. М.: Геос, 2001. 94 с.

Sr–Nd–Pb–Hf ISOTOPIC COMPOSITION OF LATE PALEOZOIC GRANITOIDS OF CENTRAL CHUKOTKA

M. V. Luchitskaya, B. V. Belyatsky, E. A. Belousova, L. M. Natapov

Presented by Academician of the RAS D.Yu. Pushcharovsky November 8, 2016

Received October 3, 2016

Results of the study of Sr–Nd–Pb–Hf isotopic composition of Late Paleozoic granitoids of Central Chukotka are represented on the example of Kibera and Kuekvun plutons. The age of granitoids of these plutons and granites from pebbles in conglomerates in the base of overlying Lower Carboniferous deposits is 351–363 Ma (U–Pb zircon, TIMS, SIMS, LA–ICP–MS). Thus, granitoid magmatism corresponds in time to tectonic events of Elsmirian orogeny in Arctic region. Sr–Nd–Pb–Hf isotopic composition of granitoids indicate participation of mantle and crustal components in the source of granite melts. Granitoids formation probably occurred in geodynamic setting of Andean type continental margin during the interaction between mantle melts, forming at the mantle wedge melting in suprasubduction conditions, and continental crust.

Keywords: Sr–Nd–Pb isotopic composition, Lu–Hf analysis, zircon, granitoids, Chukotka, Kibera and Kuekvun plutons.

УДК 550.42

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ВЫЧЛЕНЕНИЕ ПАРАГЕНЕЗИСОВ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ АССОЦИАЦИЙ В ИСКОПАЕМЫХ УГЛЯХ

Л. А. Адмакин, С. Г. Парада

Представлено академиком РАН Г.Г. Матишовым 29.11.2016 г.

Поступило 31.10.2016 г.

Выведены статистические соотношения, характеризующие содержания микроэлементов в органической части и минеральной примеси ископаемых углей. Рассчитаны доверительные интервалы распределения этих содержаний. Содержания микроэлементов в границах доверительных интервалов относятся к кларковым распределениям, превышающие верхнюю границу доверительного интервала — к аномальным повышенным.

Ключевые слова: уголь, кластическая минеральная примесь, органическое вещество, микроэлементы, ассоциации, парагенезисы, статистическое вычленение парагенезисов.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485163-66>

В ископаемых углях констатированы почти все химические элементы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Из них С, Н, О, N, S — органогенные — конституэнты органического вещества. Значительная часть неорганических химических элементов находится в минеральной примеси, органическом веществе либо там и там и своим валовым составом определяет важнейшие параметры качества углей: зольность, сернистость и пр. Доминирующая часть зольных элементов связана с минеральными частицами глинистой, алевроитовой фракциями, в меньшей степени — с несистематически развитыми выделениями диагенетических минералов (анкерит, кальцит, пирит, марказит, мельниквит, гематит, магнетит и др.).

Особое семейство составляют микроэлементы, представляющие интерес для промышленного извлечения, содержания которых в ископаемых углях $n \cdot 10^{-4} - n \cdot 10^{-1} \%$ [1]. Такие элементы могут присутствовать в составе органической и минеральной частей, однако установить соответствие распределения их содержаний между этими составляющими углей до сих пор не удавалось. Попытки установить эти связи корреляцией содержаний с зольностью углей [2–5] не увенчались успехом, а формы нахождения микроэлементов, оцениваемые по фракциям разной плотности [5], намечают лишь общую тенденцию связей. Вместе с тем для количественной оценки ресурсов и технологических возможностей извлечения таких микроэлементов из ископаемых

углей приоритетна их дифференциация на вещество-генетические составляющие.

В нашей работе изложены результаты оригинальных многолетних исследований геохимии ископаемых углей, позволяющие средствами математической статистики вычленить парагенезисы микроэлементов, с которыми связана потенциальная металлоносность ископаемых углей.

Очевидно, что сонахождение микроэлементов в углях вне зависимости от характера связей представляет собой ассоциацию [6]. Ассоциации, не только в разных угольных месторождениях, но и угольных пластах, всегда полиэлементные вследствие принципа “всюдности элементов” В.И. Вернадского [7], но различаются уровнями концентраций, определяющими редкометальность углей.

Ассоциация включает особую совокупность микроэлементов, которая концентрируется в стадию диагенетического преобразования органического вещества биохимического ряда в органическое вещество угольного ряда. Такая совокупность элементов в углях отвечает понятию парагенезиса. Их нахождение в органическом веществе определяется химическим сродством к гуминовым кислотам, гуминам [8, 9]. Лишь немногие из них (Fe, Cu, Zn, Pb, Hg, Ni) способны при достаточной концентрации в растворе выделяться в минеральных фазах (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, киноварь, линнеит), прорастающих органическую массу. Поскольку эти минеральные фазы также имеют диагенетическое происхождение, то они когенетичны с микроэлементами органического вещества и со-

Институт аридных зон Южного научного центра
Российской Академии наук, Ростов-на-Дону
*E-mail: admakin@yandex.ru

ставляют единый парагенезис. Следовательно, по набору микроэлементов парагенезис всегда значительно сокращён относительно микроэлементов ассоциации. К парагенезису не относятся микроэлементы кластических минералов; они могут давать в угольных пластах относительно повышенные содержания, но, как правило, локальные, точечные, случайные, независимые от распределения парагенетических микроэлементов. Носители их — минеральные частицы алевро-пелитовой фракции, поступавшие из сопряжённых областей питания в органическую систему в качестве твёрдого стока. Эта фракция в углях характеризуется, как показывают результаты систематического опробования, содержаниями микроэлементов на уровне кларков для глин, сланцев [10].

Кластическая минеральная примесь в углях представлена алевро-пелитовой фракцией. Отсюда концентрации микроэлементов в угле, обусловленные этой фракцией, определяются величиной $\text{Кл} \cdot A^d/100$, где Кл — кларк микроэлемента в этой фракции, A^d — зольность угля в %. Далее нет оснований не полагать, что выборочные средние для микроэлементов в углях, обусловленные минеральной примесью, характеризуются тем же выборочным распределением, что и их кларки, которые можно рассматривать как средние по генеральной выборке. Для выборочных средних можно найти, используя в качестве средних кларки микроэлементов, доверительные интервалы концентраций этих элементов с коэффициентом доверия $1 - \alpha$. Тогда с вероятностью 95% можно утверждать, что концентрации каждого микроэлемента, связанные в угле с минеральной примесью $C_{\text{мин}}$, будут находиться в заданном доверительном интервале. Эти концентрации будут представлять фоновый уровень микроэлементов в угле. Вправе также утверждать, что содержания микроэлементов, выходящие за границы соответствующих им доверительных интервалов, с этой же вероятностью не принадлежат к фоновым. Такие значения содержаний микроэлементов следует относить к повышенным. Они создаются концентрациями микроэлементов в органической части углей $C_{\text{орг}}$, где их носители — мацералы группы витринита и витринизированная основная масса. Мацералы группы инертинита, как известно, не концентрируют микроэлементы.

Доверительный интервал определяется для среднего значения содержания микроэлемента, выборочное распределение которого является t -распределением Стьюдента с $\nu = n - 1$ степенями свободы. Для наших целей используем лишь правую (большую)

часть симметричного доверительного интервала. В результате получаем функцию, связывающую концентрацию микроэлемента в углях относительно доверительного интервала $\text{Кл} \cdot A^d/100 + t_v(1 - \alpha/2)\sigma/\sqrt{n}$, где σ — стандартное отклонение содержаний микроэлемента по выборке; n — объём выборки. Вероятность того, что интервал $\text{Кл} \cdot A^d/100 + t_v(1 - \alpha/2)\sigma/\sqrt{n}$ покроет истинное значение содержаний микроэлемента, равна $1 - \alpha$. Подчеркнём, что $\text{Кл} \cdot A^d/100 + t_v(1 - \alpha/2)\sigma/\sqrt{n}$ характеризует содержание микроэлемента в кластической минеральной примеси $C_{\text{мин}}$.

Если содержания микроэлемента в ассоциации C_{ac} удовлетворяют условию

$$C_{\text{ac}} \leq \text{Кл} \cdot A^d/100 + t_v(1 - \alpha/2)\sigma/\sqrt{n}, \quad (1)$$

то такой микроэлемент связан с кластической минеральной примесью ($C_{\text{ac}} = C_{\text{мин}}$), а угли будут характеризоваться фоновым уровнем его содержаний. Такие содержания могут варьировать в границах доверительного интервала в зависимости от зольности угля и концентрации микроэлемента в минеральном носителе.

Если имеет место соотношение

$$C_{\text{ac}} > \text{Кл} \cdot A^d/100 + t_v(1 - \alpha/2)\sigma/\sqrt{n}, \quad (2)$$

то микроэлемент связан с органическим веществом. Тогда концентрация микроэлемента в органической части составит

$$C_{\text{орг}} = C_{\text{ac}} - (\text{Кл} \cdot A^d/100 + t_v(1 - \alpha/2)\sigma/\sqrt{n}). \quad (3)$$

Значения $t_v(1 - \alpha/2)$, где $\alpha = 0,05$, снимаются по номограмме [11] в зависимости от объёма выборки. Например, при $n = 30$ значение $t_v(0,975) = 2$, отсюда доверительный интервал равен $\text{Кл} \cdot A^d/100 + 0,364\sigma$. Этот доверительный интервал с вероятностью 95% перекрывает истинные значения содержаний, которые являются, таким образом, фоновыми для оцениваемых углей.

Микроэлементы, содержания которых в угле отвечают условию (2), составляют парагенезис, а уровни этих содержаний в органическом веществе определяются соотношением (3). Концентрации таких микроэлементов в углях должны рассматриваться как повышенные. Микроэлементы ассоциации, содержания которых подчиняются условию (1), в парагенезис не входят и своим присутствием в углях обязаны минеральной примеси. Следует отметить, что на практике фоновые и повышенные уровни концентраций микроэлементов оценивают относительно их кларков. Соответственно, считают,

что содержания микроэлементов, превышающие их кларки, — повышенные, все остальные — кларковые. Соотношения (1)–(3) показывают, что такой способ оценки нельзя признать корректным, так как в группу повышенных включаются микроэлементы с содержаниями, отвечающими соответствующим доверительным интервалам, т.е. кларковых уровней, что нередко приводит к необоснованному завышению редкометального потенциала углей. Более того, этим путём невозможно выделить парагенезисы микроэлементов.

Истинные значения концентраций микроэлементов в органической и минеральной частях должны оцениваться по их содержаниям относительно соответствующих доверительных интервалов. Этим величины $(Kл \cdot A^d / 100 + t_v(1 - \alpha/2)\sigma/\sqrt{n})$ представляют собой критические границы между фоновыми и повышенными содержаниями.

Таким образом, получен теоретически объективный способ дифференциации ассоциации микроэлементов в углях на группу с фоновыми и группу с повышенными содержаниями. Последние представляют парагенезис, который может служить количественной характеристикой редкометального потенциала ископаемых углей. Содержания некоторых микроэлементов могут превышать минимально промышленные значения. Концентрации таких микроэлементов целесообразно считать аномальными. Только такие микроэлементы пригодны для извлечения.

Вычленение парагенезисов микроэлементов из ассоциаций в ископаемых углях рассмотрим на примерах некоторых месторождений Забайкалья (табл. 1). С высоким уровнем доверия можно говорить о двух группах микроэлементов в этих месторождениях. Первую представляют микроэлементы в углях Тарбагатайского месторождения. Угли германиеносные. В них отмечена слабая вкрапленность пирита. Концентрации всех микроэлементов (за исключением Cr) превышают границы доверительных интервалов; следовательно, парагенезис полиэлементный. Например, содержания Ge в органической части в 26 раз выше, чем в минеральной. Лишь V распределён относительно равномерно в минеральной и органической частях. Напротив, Cr связан всецело с кластической минеральной примесью.

Микроэлементы трёх других месторождений составляют вторую группу. Угли без сульфидов. Парагенезисы в углях этих месторождений представлены ограниченными наборами микроэлементов, особенно в углях Мордойского, Харанорского месторождений, в которых содержания Ge в органической части < 1 г/т. Угли Алтайского месторождения характеризуются более широким набором микроэлементов в парагенезисе, соответственно, более высоки в них концентрации Ge.

Полученные парагенетические ряды микроэлементов находятся в хорошем согласии с отмеченной В.М. Гольдшмидтом закономерностью: "...редкие элементы концентрируются как раз в тех типах

Таблица 1. Статистические параметры распределения микроэлементов в углях и их парагенезисы (n = 30)

Элемент	Кларк, г/т, по [10]	Месторождение																			
		Тарбагатайское					Мордойское					Алтанское					Харанорское				
		A ^d /100	C _{ас}	δ	C _{мин}	C _{орг}	A ^d /100	C _{ас}	δ	C _{мин}	C _{орг}	A ^d /100	C _{ас}	δ	C _{мин}	C _{орг}	A ^d /100	C _{ас}	δ	C _{мин}	C _{орг}
Be	7	24,5	1,22	2,1	22,4	2,2	1,57	7,8	—	—	3,6	1,60	5,0	—	—	2,0	1,66	4,2	—	—	
V	130	35,3	1,51	19,5	15,8	7,5	1,58	30,5	—	—	25,5	1,09	36,6	—	—	2,9	1,84	21,4	—	—	
Cr	160	18,2	1,19	24,7	—	1,4	1,41	36,4	—	—	5,3	2,51	47,0	—	—	1,1	1,15	24,1	—	—	
Co	23	19,1	2,26	7,4	11,7	2,2	1,89	8,5	—	—	4,7	1,49	9,3	—	—	7,4	2,88	7,8	—	—	
Ni	95	18,2	1,58	15,2	3,0	3,2	1,78	25,2	—	—	6,2	1,5	27,8	—	—	8,3	1,57	18,0	—	—	
Cu	57	37,0	1,19	7,1	29,9	8,7	1,57	16,3	—	—	27,7	1,17	17,1	—	—	2,8	2,43	12,4	—	—	
Zn	80	41,1	2,46	15,2	25,9	2,3	2,07	22,5	—	—	11,8	1,84	24,7	—	—	—	—	—	—	—	
Pb	20	47,5	1,58	5,5	42,0	1,3	1,33	6,9	—	—	1,2	1,43	8,1	—	—	1,0	1,17	4,7	—	—	
Ga	40	20,3	1,58	8,2	12,1	1,7	1,57	11,5	—	—	9,3	1,68	13,8	—	—	1,8	1,14	7,7	—	—	
Ge	2	35,7	2,85	5,9	29,8	1,3	1,13	2,7	—	—	7,7	1,55	3,6	—	—	1,1	1,14	2,5	—	—	
Mo	2	20,8	1,23	2,7	18,1	2,3	1,58	3,5	—	—	2,4	1,57	3,6	—	—	5,5	1,95	4,7	0,8	—	
W	2	51,4	2,4	5,0	46,4	3,4	1,99	4,4	—	—	20,6	2,92	5,2	15,4	—	—	—	—	—	—	
Парагенезисы		Be, V, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Ga, Ge, Mo, W					Нет					Cu, Ge, W					Mo				

Примечание. C_{ас}, C_{мин}, C_{орг} в г/т.

углей, которые богаты германием” [12, с. 238]. Однако исследователь не показал, как эти элементы распределены между минеральной и органической частями. Теперь можно сформулировать общую закономерность: *ископаемые угли — потенциально редкометалльные, если в ассоциации представлен полиэлементный парагенезис микроэлементов*. И такой парагенезис репрезентативный, так как вычленяется из ассоциации средствами математической статистики.

Рассмотренный способ дифференциации микроэлементов по геохимическим данным может быть использован для оценки потенциальной редкометальности угольных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России: Справочник. М.: Недра, 1996. 240 с.
2. Вистелиус А.Б. // ДАН. 1947. Т. 58. № 7. С. 1455–1457.
3. Ратынский В.М. // Тр. Биохим. лаб. АН СССР. 1946. Т. VIII. С. 183–223.
4. Погребницкий Е.О. // Зап. Ленингр. гор. ин-та. 1969. Т. 35. В. 2. С. 87–103.
5. Металлогения и геохимия угленосных и сланце-содержащих толщ СССР. М.: Наука, 1988. 256 с.
6. Адмакин Л.А. // Кокс и химия. 2015. № 11. С. 2–10.
7. Вернадский В.И. Избр. соч. М.: Изд-во АН СССР, 1954. Т. 1. С. 395–410.
8. Манская С.М., Дроздова Т.В. Геохимия органического вещества. М.: Наука, 1964. 316 с.
9. Given P. // Coal. Sci. 1984. V. 3. P. 252.
10. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
11. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. В. 1. 316 с.
12. Гольдшмидт В.М. Сборник статей по геохимии редких элементов. М.; Л.: ГОНТИ, 1938. 244 с.

THE STATISTICAL SELECTION OF THE PARAGENESIS MICROELEMENTS FROM OF THE ASSOCIATIONS IN FOSSIL COALS

L. A. Admakin, S. G. Parada

Presented by Academician of the RAS G.G. Matishov November 29, 2016

Received October 31, 2016

The statistical relationships characterizing the concentrations of minor elements in the organic part and mineral impurities in fossil coals are allocated. The confidence ranges for these concentrations are calculated. The concentrations of minor elements within the confidence ranges relate to the clarke distributions; those exceeding the upper boundary of the confidence level, to extremely high values.

Keywords: coals, clastic mineral impurity, organic matter, microelements, associations, parageneses, statistical selection parageneses.

УДК 548.0+553.876+661.693.2+542.91

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ, МОРФОЛОГИЯ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ КРИСТАЛЛОВ КВАРЦЕПОДОБНОГО ДИОКСИДА ГЕРМАНИЯ

В. С. Балицкий^{1,*}, Д. В. Балицкий¹, академик РАН Д. Ю. Пушаровский²,
Л. В. Балицкая^{1,**}, Т. В. Сеткова¹, Т. Н. Докина¹

Поступило 06.06.2018 г.

Рассмотрены условия и механизмы эпитаксиального роста кристаллов кварцеподобного α -GeO₂ на кварцевых подложках с использованием испарительно-рециркуляционного метода. Выращены относительно однородные кристаллы α -GeO₂ массой до 200 г со скоростью роста до 0,3 мм/сут. Установлено, что молекулярная адгезия (сцепление) на границе кварцевой подложки и выросшего слоя α -GeO₂ не в состоянии предотвратить переход его в стабильную труднорастворимую рутилоподобную фазу. Это не позволяет осуществить промышленное выращивание монокристаллов ВГК, используя в качестве шихты смесь кварца и кварцеподобного α -GeO₂. Однако этот процесс, вероятно, может быть реализован при нахождении других, более растворимых германийсодержащих соединений, таких как, например, кварцеподобный кремнийсодержащий оксид германия.

Ключевые слова: диоксид германия, кварц, высокогерманиевый кварц, пьезоэлектрик, рост кристаллов, эпитаксия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485167-70>

В работе приведены результаты исследований, направленных на решение проблемы получения кварцеподобного α -GeO₂, используемого совместно с α -кварцем в качестве шихты при выращивании кристаллов высокогерманиевого кварца (ВГК) [1, 2]. Такие кристаллы — ограниченные твёрдые растворы с формулой Si_{1-x}Ge_xO₂, где x достигает максимального значения 0,31 мол.% при ~760 °С [1–4]. В более ранних работах мы показали, что в реальных условиях даже при 540–600 °С, 120–150 МПа кристаллы ВГК захватывают не более 10–15 мас.% оксида Ge, а для захвата его с максимально возможными содержаниями (до 35–39 мас.%) температуру надо повысить до 720–760 °С при не менее 180 МПа. Очевидно, что такие высокие TP -параметры не приемлемы для освоения технологии выращивания кристаллов ВГК в промышленных автоклавах объёмом сотни и тысячи литров. Было выяснено также, что основная причина, ограничивающая рост кристаллов ВГК с высоким содержанием Ge, — резкое понижение его активности в растворе вследствие того, что хорошо растворимый в чистой воде и вод-

ных электролитах шихтовой кварцеподобный α -GeO₂ при > 180 °С в присутствии воды переходит в стабильную труднорастворимую рутилоподобную фазу [5, 6]. В связи с этим мы попытались выяснить экспериментально, возможно ли предотвратить переход метастабильного α -GeO₂ в стабильную плохо растворимую рутилоподобную фазу или хотя бы повысить температуру этого перехода до TP -параметров выращивания обычного пьезокварца.

В методическом отношении указанные задачи представлялось возможным решить путём эпитаксиального выращивания кристаллов метастабильного чистого и кремнийсодержащего α -GeO₂ на кварцевой подложке. Последующая термообработка при одинаковых температурах выросшего слоя α -GeO₂ без кварцевой подложки и такого же слоя α -GeO₂, но совместно с кварцевой подложкой в комплексе с анализом рентгенограмм и данных дифференциально-термического анализа (ДТА) должны были показать, способна ли молекулярная адгезия (сцепление) предотвратить переход метастабильного кварцеподобного α -GeO₂ в стабильную рутилоподобную фазу или хотя бы повысить температуру этого перехода путём введения в структуру α -GeO₂ примеси стабильного в данных условиях α -кварца.

Эпитаксиальный рост α -GeO₂ на кварцевых подложках проводили, используя разработанный нами испарительно-рециркуляционный метод [7–9].

¹ Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского Российской Академии наук, Черноголовка Московской обл.

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*E-mail: balvlad@iem.ac.ru

**E-mail: lvbalitskaya@mail.ru

Этим же методом, но с дополнительно размещёнными в кристаллизаторе обломками кварцевого стекла выращивали кремнийсодержащий α - GeO_2 . Из выращенных кристаллов α - GeO_2 выпиливали кубические образцы $4 \times 4 \times 4$ мм двух типов. Образцы первого типа — наростный слой чистого α - GeO_2 , а второго типа — такой же слой α - GeO_2 , но с кварцевой подложкой. Подготовленные таким образом образцы подвергали термообработке в воздушной атмосфере и в чистой воде при 160, 180, 200, 300, 400, 500, 700 °С в течение 24, 48, 97, 192, 264, 336 ч. Термообработку в воздушной атмосфере проводили в алундовых тиглях, помещая их в шахтные печи. В опытах с участием чистой воды использовали Cr–Ni-автоклавы объёмом 25 мл. Образцы размещали в алюминиевых (160–300 °С) и стальных (400–700 °С) ампулах. Давление в автоклавах задавали согласно *PVT*-зависимостям для чистой воды. Регулирование и контроль температуры осуществляли с использованием хромель-копелевых и хромель-алюмелевых термопар с точностью ± 3 °С и стандартных термоизмерительных приборов. В аналогичных условиях термообработке подвергали, кроме того, исходный (шихтовой) химреактив кварцеподобного α - GeO_2 . После отключения печей алундовые тигли и автоклавы 10–15 мин охлаждали в проточной холодной воде. Затем исходные и термообработанные образцы исследовали с привлечением различных минералогических и кристаллографических методов. Твёрдые фазы изучали под бинокулярным (МБС-9) и поляризационным (Amplival pro-d) микроскопами. Содержание Ge, Si и других элементов в кристаллах определяли с помощью локального рентгеноспектрального микроанализатора на цифровом электронном сканирующем микроскопе CamScan MV2300, оснащённом YAG-детекторами вторичных и отражённых электронов и энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA Energy. Идентификацию структур полиморфных модификаций оксидов Ge и других новообразованных фаз проводили с помощью порошковых рентгенограмм, полученных на дифрактометре Bruker D8-advance. Выяснение возможного влияния примеси Si в структуре метастабильного α - GeO_2 на повышение температуры его перехода в стабильную рутилоподобную фазу проводили с использованием ДТА на термоанализаторе TAG 24S16 “SETARAM” в платиновых тиглях в атмосфере воздуха. Масса образцов дроблённого α - GeO_2 составляла 150–200 мг. В каждом эксперименте измеряли кривые нагрева и охлаждения вместе с кривыми потери массы со скоростью 5 град/мин.

В общей сложности испарительно-рециркуляционным методом было выращено >50 кристаллов α - GeO_2 массой 10–200 г с толщиной нароста 4–12 мм на одну сторону от кварцевой подложки (рис. 1). Максимальные скорости эпитаксии α - GeO_2 не превышали 0,3 мм/сут и были зафиксированы на кварцевых подложках, параллельных базисному пинакоиду $c\{0001\}$. Минимальные скорости эпитаксии отмечали на подложках, параллельных грани гексагональной призмы $m\{10\bar{1}0\}$ и составляли первые тысячные доли мм/сутки.

При концентрации в растворах гидроксида Na > 1 и фторида аммония > 3 мас.% помимо роста кристаллов α - GeO_2 на дне и стенках кристаллизаторов выпадали германаты Na и германаты аммония соответственно. Соотношения скоростей эпитаксиального роста кристаллов α - GeO_2 в различных кристаллографических направлениях близки к таковым кристаллов кварца, выращенным при 240–340 °С и 70–100 МПа. Эти соотношения, как и кристаллографическая ориентировка кварцевых подложек, их форма и размеры определяют внешнюю морфологию выращенных кристаллов α - GeO_2 . Кварцевые подложки, параллельные граням базисного пинакоида $c\{0001\}$, тригональной призмы $x\{1\bar{2}0\}$ и тригональной пирамиды $s\{11\bar{2}1\}$, обрастали слоями роста метастабильного α - GeO_2 с образованием рельефа, сложенного, как правило, совокупностью плотно примыкающих друг к другу мелких (от сотых долей до первых миллиметров) трёхгранных пирамидок, сложенных гранями $+s\{11\bar{2}1\}$. Тем

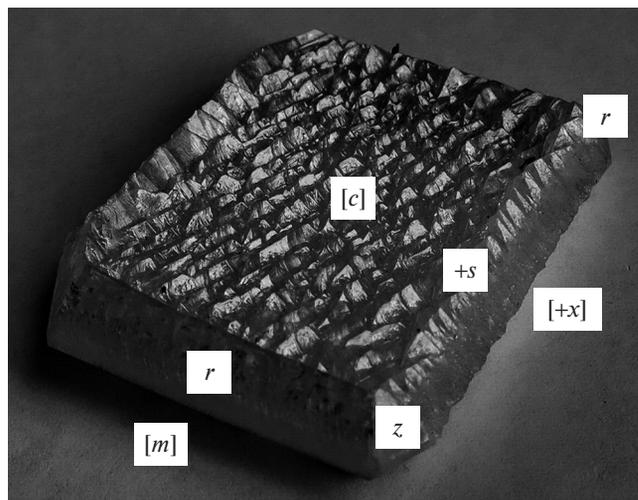


Рис. 1. Кристалл метастабильного кварцеподобного α - GeO_2 , эпитаксиально выращенный при 140 °С и давлении насыщенного пара в растворах 0,3 мас.% NH_4F на кварцевой подложке, параллельной грани базисного пинакоида $c\{0001\}$. Толщина кристалла 12 мм.

не менее при малых пересыщениях на таких подложках возможно формирование относительно однородных кристаллов α -GeO₂ (рис. 2).

Совершенный рост кристаллов α -GeO₂ отмечен и на кварцевых подложках, параллельных гладким граням $r\{10\bar{1}1\}$, $z\{01\bar{1}1\}$ и гексагональной призмы $m\{10\bar{1}0\}$. Поверхность ромбоэдрических граней покрыта вицинальными холмиками роста. Призматические грани имеют едва заметный рельеф, представленный комбинацией пологих ступеней роста и асимметричных вициналей. Во многих случаях кварцевые подложки и выросший слой кристаллов подвержены тонкой трещиноватости.

Несколько неожиданными оказались рентгенограммы исходного химреактива α -GeO₂ и эпитаксиально выращенных на его основе кристаллов α -GeO₂. В частности, было выяснено, что после термообработки при 160–700 °С на воздухе (продолжительность 24–336 ч) исходный кварцеподобный химреактив α -GeO₂ и выращенные кристаллы α -GeO₂ практически полностью сохраняют кварцеподобную структуру, хотя при температуре > 300 °С после 48-часовой выдержки в рентгенограммах начинают появляться весьма слабые полосы рутилоподобной фазы. Интенсивность их несколько возрастает по мере повышения температуры и продолжительности термообработки метастабильного кварцеподобного α -GeO₂ (рис. 3).

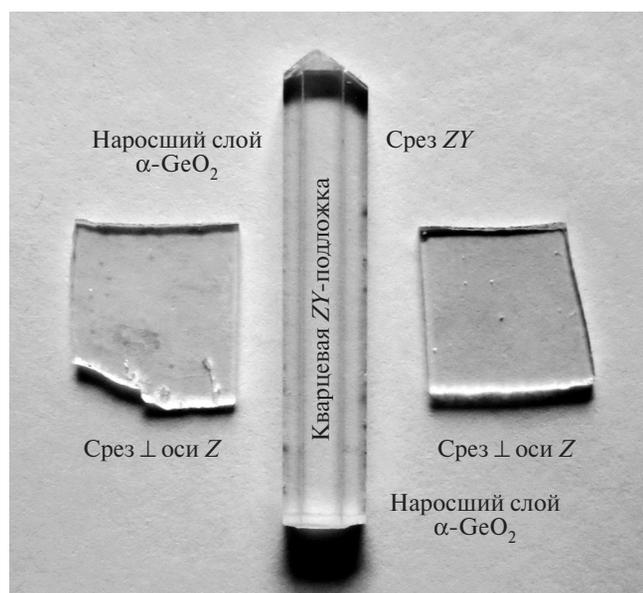


Рис. 2. Наиболее однородные пластинки кристалла низкотемпературного метастабильного α -GeO₂, выращенного во фторидных растворах с низким пересыщением при 130 °С и давлении насыщенного пара. Ширина центральной пластинки 14 мм.

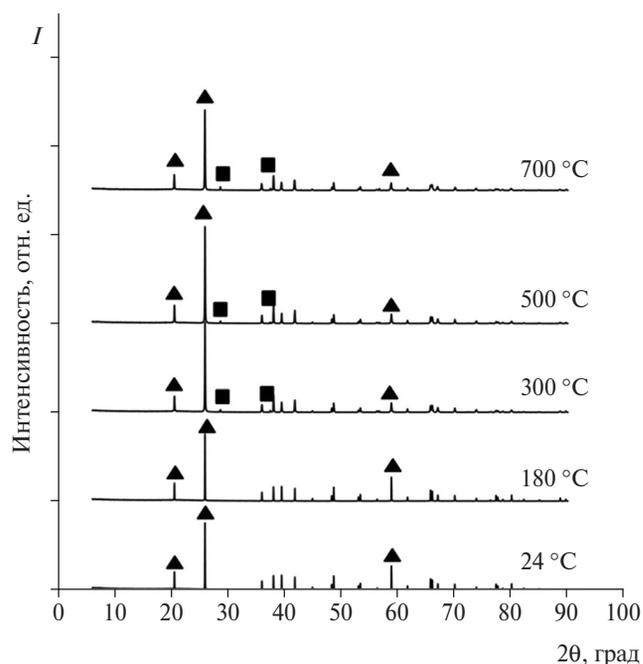


Рис. 3. Рентгенограммы кристаллов эпитаксиально выращенного метастабильного кварцеподобного α -GeO₂, предварительно отожжённых на воздухе при 180, 300, 400, 700 °С в течение 336 ч. Треугольники — рефлексы, относящиеся к фазе кварцеподобного α -GeO₂, квадраты — к рутилоподобному GeO₂.

По-иному ведёт себя метастабильный кварцеподобный α -GeO₂ при термообработке в присутствии воды. Стабильная рутилоподобная фаза появляется уже при 160 °С. Это приводит к остановке эпитаксиального зарождения и роста кварцеподобного α -GeO₂ на кварцевых подложках. При дальнейшем повышении температуры до 180–200 °С весь шихтовой и наращённый α -GeO₂ практически полностью переходит в рутилоподобную фазу. При этом конкретные температуры указанного перехода в образцах α -GeO₂ без кварцевой подложки и при её наличии отличаются не более чем на 2–3 °С, т.е. находятся в пределах точности измерения температуры. Это свидетельствует о том, что силы молекулярной адгезии не в состоянии предотвратить переход метастабильного α -GeO₂ в стабильную рутилоподобную фазу и исключает, таким образом, возможность выращивания кристаллов ВГК с использованием в качестве шихты кварцеподобного α -GeO₂. Вместе с тем изучение кремнийсодержащего метастабильного α -GeO₂ методом ДТА показало, что даже малые содержания в нём Si (до 4,5 мас.%) способны расширить температурную область метастабильного существования α -GeO₂ до 280–300 °С (рис. 4). Не исключено, что эти температуры могут быть повышены при более высоких содержаниях Si в структуре α -GeO₂.

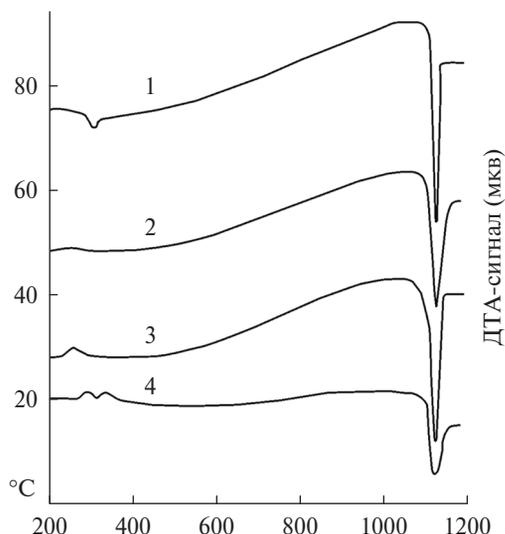


Рис. 4. Кривые ДТА кварцеподобного α -GeO₂. 1 — исходный (шихтовой) реактив кварцеподобного α -GeO₂, 2 — эпитаксиально выращенный чистый кварцеподобный α -GeO₂, 3 — эпитаксиально выращенный кварцеподобный α -GeO₂ с содержанием SiO₂ 4,38 мас.%, 4 — эпитаксиально выращенный кварцеподобный α -GeO₂ с двумя зонами роста с содержанием SiO₂ 2,4 и 3,1 мас.% соответственно.

Таким образом, полученные результаты указывают в целом на возможность эпитаксиального выращивания относительно однородных и крупных кристаллов кварцеподобного α -GeO₂ на кварцевых подложках. Одновременно это позволило установить, что молекулярная адгезия на границе кварцевой подложки и нарощенного слоя α -GeO₂ не в состоянии предотвратить переход его в стабильную труднорастворимую рутилоподобную фазу. Данное обстоятельство не позволяет осуществить промыш-

ленное выращивание монокристаллов ВГК при использовании в качестве шихты добавки метастабильного кварцеподобного α -GeO₂. Однако этот процесс, вероятно, может быть реализован при нахождении других, более растворимых германийсодержащих соединений, таких как, например, кварцеподобный кремнийсодержащий α -GeO₂.

Источники финансирования. Работа поддержана РФФИ (гранты № 17–05–00976 и № 18–05–00332).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балицкий В.С., Балицкий Д.В., Пушаровский Д.Ю., Сеткова Т.В., Балицкая Л.В., Некрасов А.Н. // ДАН. 2017. Т. 477. № 5. С. 578–581.
2. Балицкий В.С., Балицкий Д.В., Некрасов А.Н., Балицкая Л.В., Бондаренко Г.В., Самохвалова О.Л. // ДАН. 2004. Т. 396. № 1. С. 89–92.
3. Clavier D., Prakasam M., Largeteau A., Boy J.J., Hehlen B., Cambon M., Cambon O. // Cryst. Eng. Commun. 2016. V. 18. № 14. P. 2500–2508.
4. Ranieri V., Darracq S., Cambon M., Haines J., Cambon O., Largeteau A., Demazeau G. // Inorg. Chem. 2011. V. 50. № 10. P. 4632–4639.
5. Косова Т.Б., Демьянец Л.Н. // ЖНХ. 1988. Т. 33. В. 10. С. 2654–2661.
6. Roy R., Theokritoff S. // J. Cryst. Growth. 1972. V. 12. № 1. P. 69–72.
7. Балицкий Д.В., Балицкий В.С., Писаревский Ю.В., Сильвестрова О.Ю., Филуппо Э. // Кристаллография. 2000. Т. 45. № 1. С. 151–153.
8. Balitsky D.V., Balitsky V.S., Puscharovsky D.Yu., Kosenko A.V., Bondarenko G.V. // J. Cryst. Growth. 1997. V. 180. P. 212–219.
9. Balitsky D.V., Balitsky V.S., Pisarevsky Yu.V., Philippot E., Puscharovsky D. Yu., Sil'vestrova O. Yu. // Ann. Chim. Mat. 2001. V. 26. P. 183–192.

EPITAXIAL GROWTH, MORPHOLOGY AND TEMPERATURE STABILITY OF QUARTZLIKE DIOXIDE GERMANIUM CRYSTALS

V. S. Balitsky, D. V. Balitsky, Academician of the RAS D. Yu. Pushcharovsky,
L. V. Balitskaya, T. V. Setkova, T. N. Dokina

Received June 16, 2018

The conditions and mechanisms of epitaxial growth of quartz-like α -GeO₂ crystals on quartz substrates using an evaporative-recirculation method are considered. Relatively homogenous α -GeO₂ crystals weighing up to 200 g are grown at a growth rate of up to 0.3 mm/day. It is established that molecular adhesion at the boundary between the quartz substrate and the overgrown layer of α -GeO₂ cannot prevent its transition to a stable poorly soluble rutile-like phase. This makes it impossible to grow high-germanium quartz single crystals industrially using a mixture of quartz and quartz-like α -GeO₂ as a nutrient. However, this process can be implemented if other more soluble germanium-containing compounds, such as quartz-like Si-containing germanium-oxide, are found.

Keywords: germanium dioxide, quartz, high germanium quartz, piezoelectric, crystal growth, epitaxy.

УДК 550.423:551.352:550.849

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ Nd, Pb И Sr СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Член-корреспондент РАН А. В. Маслов^{1,*}, член-корреспондент РАН А. Б. Кузнецов²,
Н. В. Политова³, Н. В. Козина³, А. Н. Новигатский³, В. П. Шевченко³

Поступило 15.06.2018 г.

Рассмотрены изотопные характеристики (ϵNd , $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) проб современных донных осадков Баренцева моря, отобранных в 67-м рейсе нис “Академик Мстислав Келдыш”. Показано, что основной вклад в формирование донных осадков центральных областей Баренцева моря вносят породы Северо-Европейской континентальной окраины, находящейся в зоне влияния Нордкапского течения. Значения ϵNd и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в донных осадках этой части моря ниже, чем соответствующие характеристики инкорпорированного во льды осадочного материала, переносимого Трансполярным дрейфом. Это позволяет считать, что вклад такого материала в формирование донных осадков Баренцева моря невелик.

Ключевые слова: Баренцево море, современные донные осадки, изотопный состав Nd, Pb и Sr.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485171-75>

Тонкозернистый взвешенный материал, выносимый крупными речными артериями на континентальные шельфы Северного Ледовитого океана (СЛО), отлагается преимущественно в их пределах, однако часть его перераспределяется по всему Арктическому бассейну морскими течениями (Трансполярный дрейф, круговорот Бофорта и др.) во взвешенном состоянии или в составе дрейфующего льда. Для идентификации источников тонкозернистого взвешенного материала используются минералогический, литологический, геохимический методы и анализ биомаркёров. В последние годы для реконструкции состава пород в областях размыва начали применять анализ изотопного состава Sr, Pb, Nd донных осадков [1]. В настоящее время опубликованы данные об изотопной систематике донных осадков примерно в 110 точках акватории СЛО [2]. Максимальная информативность в установлении источников силикокластики достигается при использовании данных по изотопным Rb–Sr-, Sm–Nd-системам донных осадков. Однако многое зависит от локальных особенностей. Так, взвесь р. Маккензи имеет достаточно хорошо распознаваемый “радио-генный сигнал” и идентифицируется по всей акватории моря Бофорта. Изотопные характеристики

взвеси крупных российских рек не столь отчётливы, а интенсивное смешение материала на шельфах Евразийской части СЛО как следствие ледового разноса и локальных течений также затрудняет расшифровку его источников [2].

Нами определён изотопный состав Nd, Pb, Sr в 17 пробах современных донных осадков (пелитовые, алевроито-пелитовые и песчано-алеврито-пелитовые илы), отобранных в 67-м рейсе нис “Академик Мстислав Келдыш” [3] в акватории Баренцева моря (рис. 1, табл. 1). Полученные данные заполняют значительный пробел в изотопной характеристике современных донных осадков этого крупного эпиконтинентального бассейна.

Проанализированные пробы донных осадков характеризуют центральные и периферийные районы Баренцева моря. Подготовка образцов для определения изотопного состава Sr, Pb, Nd проведена в соответствии с методикой, описанной в [4, 5]. Изотопный анализ выполнен на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург). Точность определения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 0,002\%$), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 0,004\%$), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ($\pm 0,1\%$) контролировали путём многократного измерения соответствующих стандартов SRM-987, JNdi-1, BCR-1.

Лито-генный материал поступает в акваторию Баренцева моря в результате размыва материковых, островных и подводных поднятий, береговой солифлюкции и абразии, а также при участии ледниковой экзарации и атмосферных осадков [6–10]. Водосбор Баренцева моря в существенной степени

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург

² Институт геологии и геохронологии докембрия Российской Академии наук, Санкт-Петербург

³ Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской Академии наук, Москва

*E-mail: amas2004@mail.ru

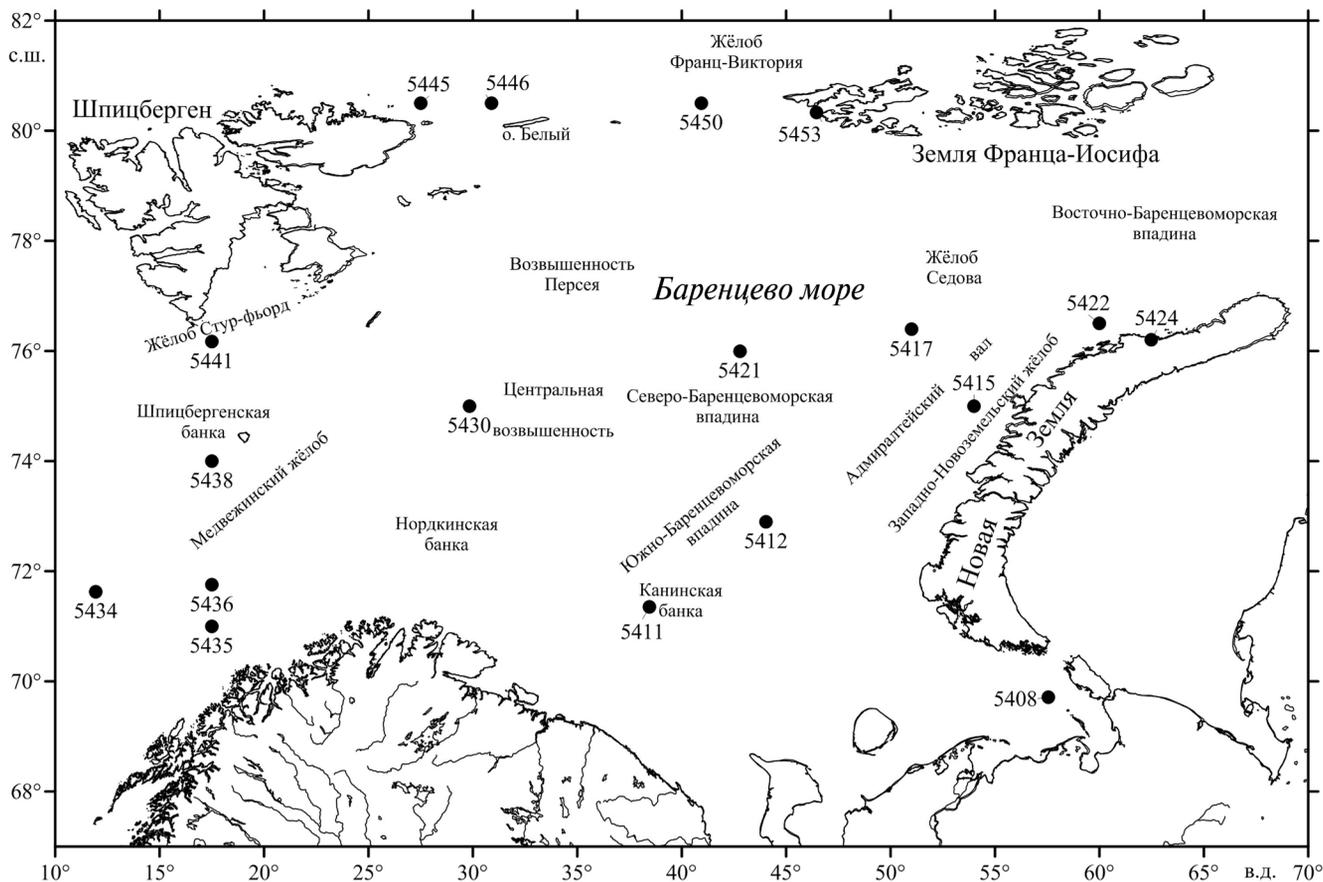


Рис. 1. Обзорная схема и положение станций, на которых отобраны пробы донных осадков Баренцева моря.

гетерогенен. Так, Кольский п-ов сложен в основном гранито-гнейсами, габбро и другими магматическими породами основного состава [11, 12]. В Тимано-Печорской области распространены

габброиды, граносиениты, а также щелочные породы [12]. На архипелаге Шпицберген известны сходные с гранитоидами Кольского п-ва массивы, вулканиты среднего и кислого составов, граниты-

Таблица 1. Изотопный состав Nd, Pb, Sr современных донных осадков Баренцева моря, отобранных в 67-м рейсе нис "Академик Мстислав Келдыш"

Станция	Sm, г/г	Nd, г/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
5408	3,2	15,6	0,1229	0,51204	-11,8	0,7137	0,8445
5411	4,6	24,9	0,1245	0,51195	-13,5	0,7176	0,8364
5412	3,7	19,9	0,1138	0,51202	-12,1	0,7169	0,8421
5415	5,3	26,8	0,1190	0,51215	-9,6	0,7152	0,8300
5417	5,2	26,3	0,1142	0,51197	-13,1	0,7167	0,8345
5421	5,1	27,1	0,1136	0,51198	-12,9	0,7158	0,8346
5422	4,8	25,1	0,1166	0,51219	-8,7	0,7150	0,8365
5424	5,9	28,9	0,1226	0,51225	-7,5	0,7139	0,8346
5430	4,9	25,8	0,1139	0,51203	-11,9	0,7171	0,8055
5434	4,4	22,8	0,1186	0,51200	-12,5	0,7112	0,8382
5435	3,9	20,9	0,1154	0,51195	-13,5	0,7111	0,8391
5436	2,4	12,1	0,1174	0,51199	-12,6	0,7107	0,8438
5438	3,4	18,2	0,1131	0,51181	-16,2	0,7108	0,8381
5441	5,6	30,5	0,1107	0,51242	-4,3	0,7165	0,8386
5445	7,3	40,0	0,1105	0,51206	-11,4	0,7248	0,8271
5450	5,0	25,4	0,1182	0,51218	-8,9	0,7160	0,8340
5453	6,3	29,1	0,1307	0,51239	-4,8	0,7110	0,8874

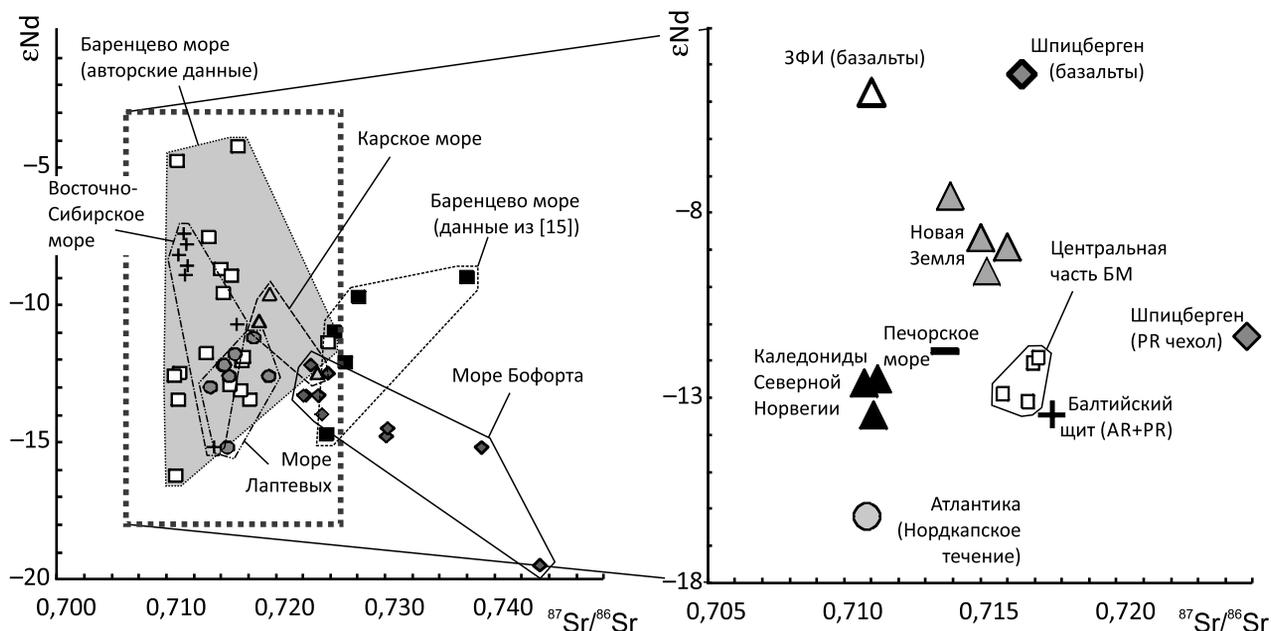


Рис. 2. Диаграмма $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – ϵNd для современных отложений ряда морей Евразийской части СЛО и моря Бофорта [2] (а) и проб донных осадков, отобранных в Баренцевом море в 67-м рейсе нис “Академик Мстислав Келдыш” (б).

рапакиви, траппы. На архипелаге Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) присутствуют юрские, меловые траппы [13]. На Новой Земле можно видеть долериты, габбро, габбро-диабазы, массивы гранитоидов [12].

Количество изученного нами материала втрое превышает данные в [2]. На диаграмме $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – ϵNd , построенной по материалам [2] для осадков морей Российской Арктики и моря Бофорта с привлечением наших оригинальных данных, хорошо видно практически полное совпадение изотопных Sr-, Nd-характеристик осадков Карского, Восточно-Сибирского, Баренцева (авторские данные) морей, а также моря Лаптевых и отсутствие такового для осадков моря Бофорта и Баренцева моря (рис. 2а).

На этой же диаграмме (рис. 2б) пробы донных осадков из различных районов Баренцева моря образуют компактные области, отражающие петрографический состав пород, размываемых вблизи мест их отбора. Наиболее высокие значения ϵNd (от –9,6 до –4,8) демонстрируют пробы из окрестностей ЗФИ и Новой Земли. Это указывает на присутствие в них большой доли мантийного материала и предполагает размыв магматических пород преимущественно основного состава. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в этих осадках 0,7110–0,7160 и строго зависит от значения ϵNd , демонстрируя обогащение мантийного материала коровой компонентой.

Вторую группу (–13,5 < ϵNd < –11,8) образуют пробы, отобранные в зоне Нордкапского течения,

входящего в Баренцево море со стороны Атлантики и влияющего на состав донных осадков в его южной части. Пробы данной группы отобраны вблизи каледонид Северной Норвегии, палеозойских осадочных образований Тимана и кристаллических пород Балтийского щита. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в пробах здесь не зависит от значений ϵNd . Наиболее низкие величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7107–0,7112) присущи пробам, взятым вблизи побережья Норвегии. В пробе, отобранной на ст. 5408 (Печорское море вблизи устья р. Печора), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ увеличивается до 0,7137. В пробе со ст. 5411 (Канинская банка, траверс Балтийского щита) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ = 0,7176. Указанный рост $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ внутри данной группы достаточно хорошо согласуется с петрографическим составом пород предполагаемых питающих провинций: он пропорционален снижению доли карбонатных пород и увеличению доли кристаллических комплексов. Исключение из сказанного составляют лишь пробы, отобранные к югу (ст. 5441, жёлоб Стур-фьорд) и северу (ст. 5445) от берегов Шпицбергена. Первая на диаграмме $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – ϵNd попадает в область смешения древних пород чехла и фундамента, вторая отвечает области основных пород, близких по составу раннемеловым базальтам ЗФИ.

Проба донных осадков, отобранная на южном склоне Шпицбергенской банки в зоне влияния Нордкапского течения (ст. 5438, граница Баренцева моря и Атлантического океана), демонстрирует самое низкое значение ϵNd (–16,2) при относительно невысоком $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7108). Это даёт основание

предполагать, что современные донные осадки указанного района сложены продуктами размыва коровых пород, но пониженная величина $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в них отражает, вероятно, присутствие биохомогенного карбонатного материала.

Анализ изотопного состава Nd, Sr в донных осадках центральной части Баренцева моря (ст. 5412, 5417, 5421, 5430) показывает, что значения ϵNd , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в них заключены в узких пределах (соответственно от $-13,1$ до $-11,9$ и от $0,7158$ до $0,7171$). На диаграмме $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\epsilon\text{Nd}$ точки указанных проб сгруппированы в поле, находящемся на пересечении изотопных Nd- и Sr-характеристик осадков из окружающих прибрежных провинций. При этом точки приближены к областям изотопных характеристик Балтийского щита и палеозойского чехла платформы. Это подчёркивает, что в составе осадков центральной части моря присутствует материал из всех окружающих районов, но максимальный вклад вносит континент.

На диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-\epsilon\text{Nd}$ поля, образуемые пробами осадков Баренцева моря (наши данные и данные [2]), Восточно-Сибирского, Карского морей и моря Лаптевых, обладают почти 90%-м перекрытием (рис. 3). В этой же области расположена референтная точка “Норвежских каледонид” [14], тогда как такая же точка Балтийского щита, характеризующаяся существенно более низким значением ϵNd ($-18,0$ [14 и ссылки в ней]), занимает обосо-

бленное положение в нижней четверти рассматриваемого графика.

Исходя из всего сказанного выше можно предполагать, что основной вклад в формирование изотопного состава Nd, Sr донных осадков Баренцева моря вносят породы Северо-Европейской континентальной окраины. Материал с островных поднятий (ЗФИ, Новая Земля), сложенных в существенной части магматическими породами основного состава, вместе с арктическими течениями, несомненно, поступает в северную часть Баренцева моря, накапливаясь в пределах первых десятков километров от их берегов. Однако этот материал не оказывает заметного влияния на изотопные характеристики донных осадков центральных районов моря. Интересно также отметить, что значения ϵNd , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в донных осадках центральной части Баренцева моря заметно ниже, чем соответствующие характеристики инкорпорированного во льды осадочного материала, переносимого Трансполярным дрейфом [14, 15]. Это позволяет считать, что вклад ледового разноса в формирование донных осадков Баренцева моря невелик.

Благодарности. Авторы благодарны экипажу нис “Академик Мстислав Келдыш”, Г.В. Малафееву, А.В. Булохову за помощь в экспедиции, Н.С. Глушковой за подготовку иллюстраций и академику А.П. Лисицыну за ценные советы.

Источники финансирования. Исследования проведены при поддержке РФФИ (гранты 14–27–00114 и 14–27–00114-П, экспедиция, интерпретация результатов) и проекта УрО РАН 18–9–5–1 (№ госрегистрации АААА–А18–118053090043–4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldstein S.L., Hemming S.R. In: Treatise on Geochemistry. Oxford: Pergamon, 2003. P. 453–489.
2. Maccali J., Hillaire-Marcel C., Not C. // Polar Res. 2018. V. 37. 1442982. <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1442982>
3. Политова Н.В., Новигатский А.Н., Козина Н.В., Терпугова С.А. // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 534–536.
4. Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Крупенин М.Т., Горохов И.М., Маслов А.В., Каурова О.К., Эльмис Р. // Литология и полез. ископаемые. 2005. № 3. С. 227–249.
5. Горохов И.М., Мельников Н.Н., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В., Турченко Т.Л. // Литология и полез. ископаемые. 2007. № 5. С. 536–551.
6. Elverhoi A., Pfirman S.L., Solheim A., Larssen B.B. // Mar. Geol. 1989. V. 85. P. 225–250.

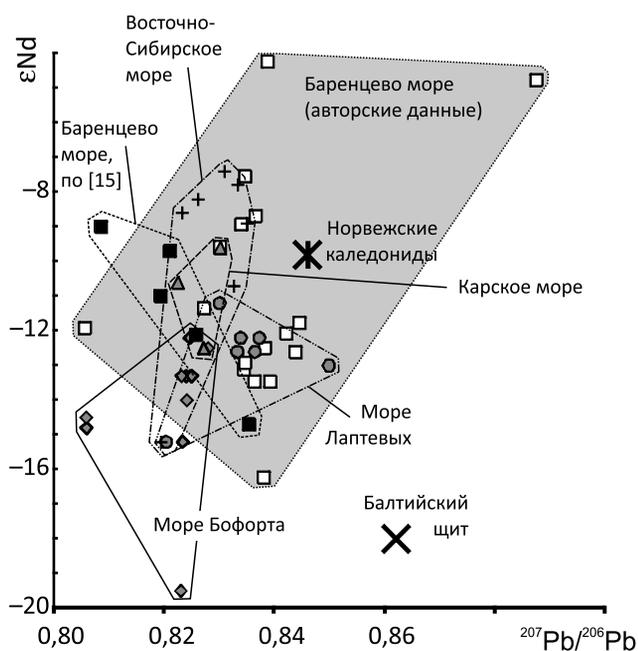


Рис. 3. Распределение точек донных осадков из морей Евразийской части СЛО и моря Бофорта (по [2]) и авторским данным) на диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}-\epsilon\text{Nd}$.

7. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И., Лисицын А.П., Серова В.В. // ДАН. 1997. Т. 355. № 5. С. 673–676.
8. Айбулатов Н.А., Матюшенко В.А., Шевченко В.П., Политова Н.В., Потехина Е.М. // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология. 1999. № 6. С. 526–540.
9. Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
10. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т-41–44 — мыс Желания. Объясн. зап. СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 2013. 200 с.
11. Геологическая карта Кольского региона 1:500 000 / Отв. ред. Ф.П. Митрофанова. Апатиты: МПР России, ГИ КНЦ РАН, 2001.
12. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 9. Моря Советской Арктики. Л.: Недра, 1984. 280 с.
13. Чернышева Е.А., Харин Г.С., Столбов Н.М. // ДАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 238–241.
14. Маслов А.В., Шевченко В.П., Кузнецов А.Б., Штайн Р. // Геохимия. 2018. № 8. С. 1–17.
15. Маслов А.В., Шевченко В.П., Кузнецов А.Б., Штайн Р., Герланд С. // ДАН. 2018. Т. 479. № 6. С. 682–687.

ISOTOPIC COMPOSITION OF Nd, Pb, AND Sr IN MODERN BOTTOM SEDIMENTS OF THE BARENTS SEA

Corresponding Member of the RAS A. V. Maslov, Corresponding Member of the RAS A. B. Kuznetsov,
N. V. Politova, N. V. Kozina, A. N. Novigatsky, V. P. Shevchenko

Received June 15, 2018

The isotopic characteristics ((Nd, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of the modern bottom sediments sampled in the Barents Sea during the 67th voyage of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” are considered. It is shown that the major contribution to the formation of the sediments in the central Barents Sea is made by rocks of the North European continental margin, which are found in the zone of influence of the North Cape Current. The values of (Nd, and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ are lower in the bottom sediments of this part of the sea than the corresponding characteristics of sedimentary material incorporated into ices and carried by the Transpolar Drift Stream. This allows one to conclude that such material has not contributed much to the sedimentation in the Barents Sea.

Keywords: Barents Sea, modern bottom sediments, isotopic composition of Nd, Pb, and Sr.

УДК 551.511

СВЯЗЬ ЧАСТОТЫ МОЛНИЙ СО СТАТИСТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОНВЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ В АТМОСФЕРЕ

А. В. Елисеев^{1,2,3,*}, А. Н. Плосков¹, А. В. Чернокульский²,
академик РАН И. И. Мохов^{1,2,4}

Поступило 03.07.2018 г.

Разработана модификация часто используемой схемы Прайса—Ринда для вычисления частоты молний (ЧМ), которая может быть использована при расчётах с большим шагом по времени и пространству. При таких шагах по времени и пространству показатель степени в зависимости частоты вспышек от высоты конвективных облаков оказывается меньше в 2 раза над сушей и на четверть над океаном, чем в исходном варианте схемы Прайса—Ринда. Модифицированная версия схемы внедрена в климатическую модель (КМ) ИФА РАН. Результаты расчётов характеристик молниевой активности с модифицированной схемой лучше согласуются со спутниковыми данными для частоты молний, чем с исходной версией. В КМ ИФА РАН при глобальном потеплении (похолодании) ЧМ увеличивается (уменьшается) во все сезоны. Чувствительность частоты молний к изменению приповерхностной температуры атмосферы на глобальном уровне получена равной 10%/К.

Ключевые слова: вспышки молний, конвективная активность, статистическое гамма-распределение, EMIC, IAP RAS CM, сценарий RCP 8.5.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485176-82>

Молниевая активность связана как с динамическими процессами в атмосфере, так и с процессами атмосферного электричества [1]. Она важна для экологических приложений (молниевые удары часто служат причиной природных пожаров) и для задач химии атмосферы (по существующим оценкам молниевые вспышки генерируют около 15% массы окислов азота в атмосфере) [1]. Как следствие, в настоящее время в климатические модели внедряются параметризации молниевой активности, связывающие частоту молниевых вспышек с характеристиками конвективной облачности [2–5]. В частности, в [2] частота молний (ЧМ) на единицу площади f связывается с высотой верхней границы конвективной облачности h :

$$f = Ch^\alpha, \quad (1)$$

причём значения показателя степени α (а также коэффициента C) различны для конвективных облаков континентального и морского происхождения: для облаков первого типа $\alpha = 4,9$, второго $\alpha = 1,7$.

Однако такие параметризации не могут быть использованы в климатических моделях промежуточной сложности (КМПС) с шагом вычислительной сетки по пространству $\sim 10^8$ м и шагом по времени 10^5 – 10^6 с [6]; эти значения на несколько порядков превышают соответственно характерный пространственный масштаб конвективных облачных систем (10^4 м) и характерное время их жизни (10^3 – 10^4 с). Как следствие, в КМПС на каждом шаге по времени и в каждой горизонтальной модельной ячейке реализуется уже набор конвективных систем. При этом “средние” (воспроизводимые моделью) характеристики этих систем получают пространственно-временным осреднением индивидуальных конвективных систем. Такое осреднение работает как сглаживающий оператор, понижая порядок степени в (1).

К числу КМПС относится климатическая модель Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [7] — единственная российская модель такого класса. Особенностью КМ ИФА РАН являются явный расчёт крупномасштабного (с временным и пространственным масштабами, превышающими соответствующие значения для синоптических процессов) состояния системы и параметризованные вычисления статистических характеристик синоптических процессов. Пространственное разрешение КМ ИФА РАН составляет $4,5^\circ$ по широте и 6° по долготе, шаг по времени 5 сут. Подобно остальным

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет)

*E-mail: eliseev@ifaran.ru

КМПС это не позволяет разрешать явно отдельные конвективные облака или даже отдельные системы таких облаков.

Цель данной работы — модификация схемы [2] для использования в КМПС, внедрение этой схемы в климатическую модель ИФА РАН и анализ чувствительности характеристик молниевой активности при климатических изменениях в численных экспериментах с КМ ИФА РАН.

Обобщение схем вычисления ЧМ можно провести, если рассмотреть не отдельные конвективные системы, а статистический ансамбль таких систем. При этом необходимо ввести функцию распределения вероятности для h . По данным измерений над европейской территорией СССР [8] эта функция может быть приближена гамма-распределением с параметром формы $a > 1$ и параметром масштаба b . Подобное также может быть получено для максимальной высоты радарного эха от грозовых облаков [9]. Для такого распределения средняя высота облаков $H = ab$, стандартное отклонение высоты облаков $\sigma = a^{1/2}b$, а коэффициент вариации $k = \sigma/H = a^{-1/2}$. Из условия $a > 1$ следует, что $k < 1$. Отметим, что по данным зондирования для максимальной высоты радарного эха от грозовых облаков $k < 0,3$ [9].

При численных расчётах для h при различных $1 \leq H \leq 20$ км и $0 \leq k \leq 1$ для гамма-распределения, соответствующего таким H и k , строилась статистическая выборка. При этом для исключения очень больших и не соответствующих наблюдениям (см., например, [8]) значений h предполагали, что $h \leq h_{\max} = 20$ км. По данным этой выборки вычисляли среднее по ансамблю $\langle f \rangle = C \langle h^\alpha \rangle$ (треугольные скобки означают осреднение по ансамблю). Затем при каждом значении k показатель степени α определяли с использованием линейной регрессии $\ln \langle f \rangle$ на $\ln \langle h \rangle = \ln H$.

Результаты проведённых расчётов выявили монотонное уменьшение α при увеличении k как над сушей, так и на океаном (рис. 1). При узком распределении для h ($k \ll 1$) значения показателя степени в (1) близки к рекомендованным в [1]. При широком распределении ($k \rightarrow 1$) эти показатели уменьшаются до 2,6 над сушей и до 1,3 над океаном. При всех $0 \leq k \leq 1$ коэффициент корреляции регрессии $\ln \langle f \rangle$ на $\ln H$ превышает 0,96. Как следствие, соотношение (1) с модифицированным значением α действительно можно использовать для вычисления ЧМ в КМПС.

Схема, основанная на (1), была внедрена в КМ ИФА РАН. Дополнительно предполагалось, что мол-

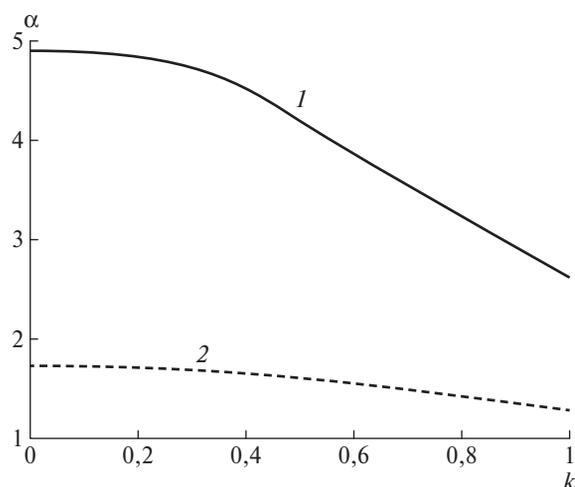


Рис. 1. Зависимость показателя степени α в соотношении (1) от коэффициента вариации k для функции распределения вероятности высоты конвективной облачности; 1 — суша, 2 — океан.

ниевые вспышки возможны лишь в части ячейки, занятой конвективной облачностью. В результате вместо (1) в КМ ИФА РАН использовали функциональную зависимость

$$f = Ch^\alpha n_{co}, \quad (2)$$

где n_{co} — количество конвективной облачности в вычислительной ячейке КМПС. Величину n_{co} вычисляли в соответствии с [10]. Высоту тропопаузы, необходимую для расчёта H , в КМ ИФА РАН задавали согласно [11] в виде многочлена третьей степени от приповерхностной температуры атмосферы. Следует отметить, что множитель n_{co} при расчёте ЧМ в соответствии со схемой [2] (или подобными ей) ранее в климатических моделях не учитывался (см., например, [2–5]).

С КМ ИФА РАН были проведены численные расчёты для периода 1700–2100 гг. при сценариях антропогенных воздействий с учётом изменения содержания парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O) в атмосфере, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, изменения солнечной постоянной и изменения сельскохозяйственных площадей. Эти воздействия для 1700–2005 гг. принимали в соответствии с условиями “Historical simulations” проекта CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5; <http://www.Pasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>). Для периода 2006–2100 гг. соответствующие воздействия задавались в соответствии со сценарием RCP 8.5.

Все расчёты были проведены с версией модели, в которой показатели степени задавались в соответствии со значениями, полученными при коэффи-

коэффициенте вариации $k = 1$ (версия М), а также со значениями из [2] (версия О). В связи с учётом n_{co} в (2) были проведены расчёты как с полной схемой (2) (версия I), так и с её вариантом, в котором вместо изменяющегося от года к году n_{co} использовалось многолетнее среднее (с учётом годового хода) количество конвективной облачности для доиндустриального периода (версия Р). Далее введены обозначения X-Y, где X — либо I, либо Р, а Y — либо М, либо О.

На глобальном уровне для современного периода все версии КМ ИФА РАН хорошо согласуются со спутниковыми данными LIS/OTD (Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector) [12]. Если по данным наблюдений для 1995–2014 гг. глобальная ЧМ $F_g = 46 \pm 5 \text{ с}^{-1}$, то в зависимости от версии КМ ИФА РАН для этого интервала времени F_g изменяется от 44 до 47 с^{-1} (рис. 2). Однако при выделении суши и океана видно, что версии I-М и Р-М гораздо лучше согласуются с данными LIS/OTD, чем версии I-О и Р-О. В частности, если в первых двух версиях для 1995–2014 гг. при осреднении над сушей $F_l = 35\text{--}37 \text{ с}^{-1}$ (в удовлетворительном согласии с данными LIS/OTD, в которых соответствующее значение равно $41 \pm 4 \text{ с}^{-1}$), то в последних двух версиях — $26\text{--}27 \text{ с}^{-1}$ (уже значительно меньше эмпирической оценки). При переходе от версий О к версиям М также существенно улучшается согласие осреднённой над океанами ЧМ со спутниковыми данными. Если в версиях I-М и Р-М соответствующее значение для периода 1995–2014 гг. равно $8\text{--}9 \text{ с}^{-1}$ (по данным LIS/OTD — $5 \pm 1 \text{ с}^{-1}$), то в версиях I-О и Р-О оно равно $18\text{--}20 \text{ с}^{-1}$.

Улучшение согласия f со спутниковыми данными при переходе от версий О к версиям М наиболее значимо для Центральной Африки, тропических акваторий океана, для юго-востока Северной Аме-

рики и Центральной Евразии (рис. 3). Следует отметить, что, несмотря на улучшение воспроизведения f для Центральной Африки, ЧМ здесь остаётся меньше, чем для Центральной Америки. Это несоответствие, впрочем, характерно для всех современных климатических моделей с параметризацией ЧМ [3–5].

Согласно полученным результатам, в XIX–XX вв. климатические изменения не приводят к существенным изменениям частоты молниевых вспышек в КМ ИФА РАН как в глобальном (рис. 2), так и региональном масштабах ($\leq 10\%$). Это согласуется с результатами расчётов с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM6 [4]. Кратковременные похолодания после вулканических извержений приводят к общему уменьшению ЧМ. После извержения вулкана Тамбора (1815 г.) значение F_g уменьшилось от 44,1 до 39,6 с^{-1} , а после извержения вулкана Пинатубо (1991 г.) — от 45,1 до 43,6 с^{-1} . Уменьшение f при этом максимально по абсолютной величине в тропиках и субтропиках.

Потепление климата в XXI в. приводит к увеличению частоты молниевых вспышек. В версии I-М при сценарии RCP 8.5 величина F_g увеличивается к 2090–2100 гг. до 58 с^{-1} , т.е. чуть более чем на четверть относительно соответствующего значения для 1995–2014 гг. — близко к соответствующему значению, полученному с моделью ECHAM6 [4]. Частота молниевых вспышек на единицу площади изменяется во все сезоны не более чем на 10% в тропиках над океанами между 1995–2014 и 2090–2100 гг. В регионах максимальной ЧМ в современный период (на юго-востоке Азии, в центре Африки и в Центральной Америке) f к концу XXI в. увеличивается на 10–20%; абсолютные изменения ЧМ максимальны в этих регионах (рис. 4). Над континентами в средних широтах увеличение частоты вспышек

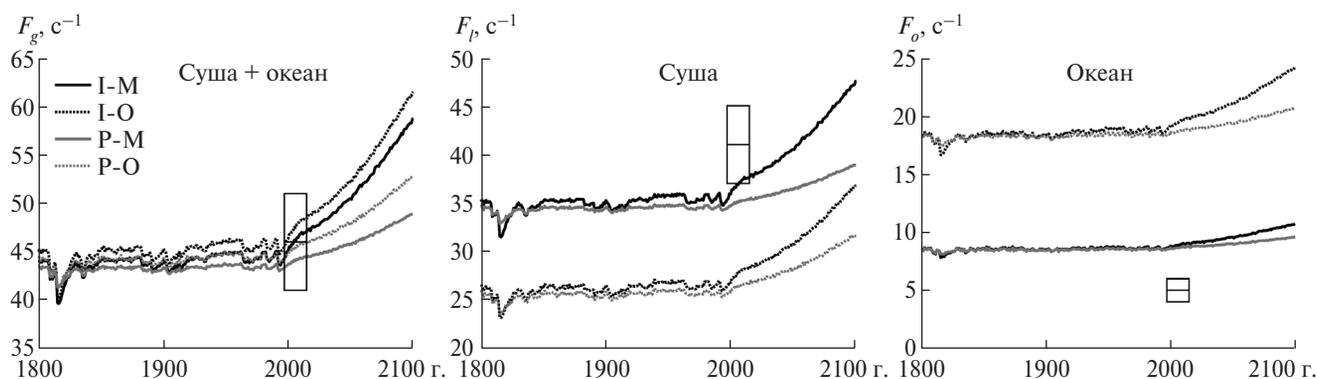


Рис. 2. Глобальная (в том числе отдельно над сушей и над океаном) среднегодовая частота молниевых вспышек в численных экспериментах с КМ ИФА РАН. Прямоугольниками показаны соответствующие оценки по спутниковым данным LIS/OTD (средние и интервалы неопределённости).

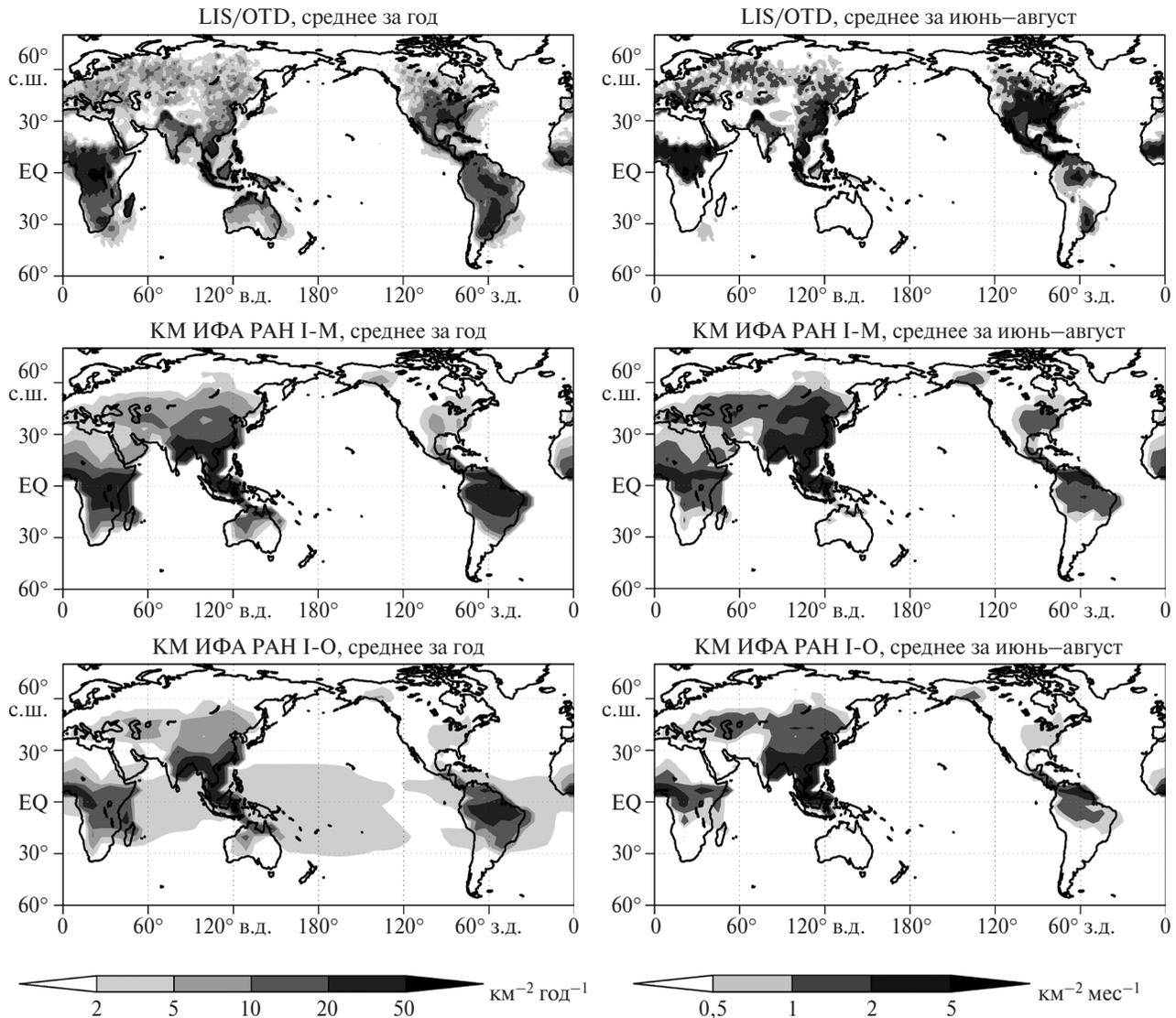


Рис. 3. Частота молниевых вспышек на единицу площади в 1995–2014 гг. по данным наблюдений LIS/OTD и в расчётах с различными версиями КМ ИФА РАН.

к концу XXI в. превышает двукратное относительно современного периода.

Уменьшение показателей степени α в (2) (переход от версий О к версиям М) приводит к резкому уменьшению отклика среднегодовых значений f над океанами в тропиках (рис. 4). При этом в других регионах среднегодовой отклик f меняется не очень значительно. Для обеих версий I модели пространственная структура отклика f принципиально различается для разных сезонов. Если в среднем за год отклик максимален в тропиках и субтропиках, то летом в этих версиях климатические изменения f над континентами средних широт в XXI в. при сценарии RCP 8.5 подобны по абсолютной величине полученным для более низких широт.

Сравнение версий I и Р модели свидетельствует о том, что высокая чувствительность f к изменениям

климата над континентами средних широт связана с соответствующими изменениями количества конвективной облачности: n_{co} в этих регионах летом значительно увеличивается в XXI в. при сценарии RCP 8.5 (рис. 4). Это согласуется с увеличением количества конвективной облачности над Евразией и Северной Америкой, выявленным по данным наблюдений при потеплении климата в последние десятилетия XX в. [13], и связано с изменением статической устойчивости атмосферы [14]. Следует отметить, что полученное в расчётах с КМ ИФА РАН изменение n_{co} может не проявляться в других моделях. Например, в климатической модели INMCM4 площадь регионов, в которых проявляются конвективные процессы в атмосфере, уменьшается при потеплении климата [3]. Кроме того, тенденции изменения количества конвективной облачности

КМ ИФА РАН

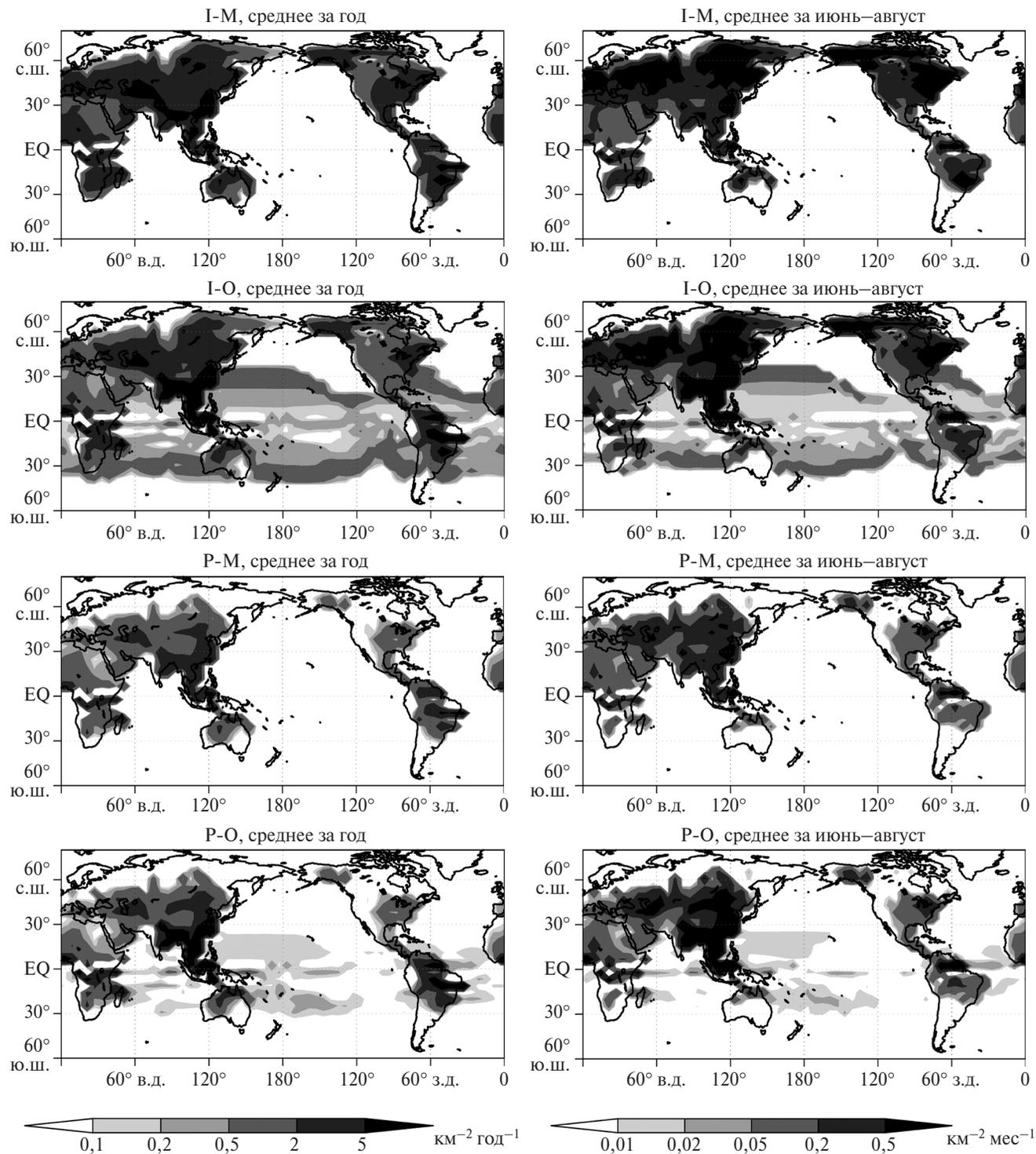


Рис. 4. Изменение частоты молниевых вспышек на единицу площади от 1995–2014 до 2090–2100 гг. в различных версиях КМ ИФА РАН.

различаются вплоть до знака по разным массивам данных для конца XX в. [15].

Для версий Р КМ ИФА РАН, в которых не учитывается изменение количества конвективной облачности при климатических изменениях, чувстви-

тельность f к изменениям климата существенно меньше, чем для версий I, особенно в средних широтах над континентами (рис. 4). Это связано с неучётом существенного увеличения количества конвективной облачности в этих регионах в тёплый

период года. Для версии О при этом дополнительно проявляется уменьшение чувствительности ЧМ над океанами тропиков.

Развитие параметризации частоты молний в данной работе играет существенную роль для определения значения чувствительности K_g глобальной ЧМ к изменениям климата. Уменьшение показателя степени в соотношениях (1) и (2) (переход от версий О к версиям М) уменьшает эту чувствительность. Для версии I-M она равна 9,7%/К, тогда как для I-O — 10,9%/К (рис. 2). Эти значения близки к полученным с моделью общей циркуляции атмосферы ЕСНАМ6 [4]. По расчётам с КМ ИФА РАН примерно половина значения K_g связана с ростом количества конвективной облачности n_{co} при климатических изменениях. Для версий Р-М и Р-О, в которых изменение n_{co} при климатических изменениях не влияет на f , величина K_g равна 3,7 и 5,8%/К соответственно. Эти значения находятся в пределах интервала значений K_g для разных моделей (от -3 до $+14\%/К$ [3–5]).

Согласно рис. 2, относительная чувствительность ЧМ к климатическим изменениям больше над сушей, чем над океаном (K_l и K_o соответственно). Для версий I-M и I-O $K_l = 11$ и $13\%/К$ соответственно, а $K_o = 7$ и $9\%/К$ соответственно. Для версий Р-М и Р-О $K_l = 3,9$ и $7,6\%/К$ соответственно, а $K_o = 3,7$ и $3,8\%/К$ соответственно. Все эти значения находятся внутри интервалов $-4 \leq K_l \leq +17\%/К$ и $-6 \leq K_o \leq +10\%/К$, полученных при различных параметризациях ЧМ в модели общей циркуляции атмосферы САМ5 [5].

Таким образом, разработана модификация пространственной схемы [2] для вычисления ЧМ, которая может быть использована для моделей с большим шагом по времени и пространству, а также при расчётах, для которых доступны лишь данные с временным разрешением, недостаточным для оценки мгновенных значений характеристик конвективной активности в атмосфере. Пространственно-временное осреднение приводит к понижению показателя степени в зависимости ЧМ от высоты верхней границы грозных облаков. При достаточно широком (с единичным коэффициентом вариации) распределении вероятности для высоты грозных облаков этот показатель степени уменьшается относительно случая единичных конвективных систем в 2 раза над сушей и на четверть над океаном.

Модифицированная версия схемы, учитывающая, что молниевая активность возможна только в покрытой облаками части модельной ячейки, внедрена в КМ ИФА РАН, с которой проведены чис-

ленные эксперименты в соответствии с условиями международного проекта сравнения климатических моделей CMIP5. В этих расчётах получено, что характеристики молниевой активности при модифицированной схеме лучше согласуются со спутниковыми данными о ЧМ, чем в исходной версии. При этом, с одной стороны, уменьшение показателя степени зависимости ЧМ-вспышек от средней высоты конвективной облачности уменьшает чувствительность частоты молниевых вспышек к изменениям климата. С другой стороны, положительная корреляция количества конвективной облачности с температурой тропосферы увеличивает климатическую чувствительность ЧМ. Глобальное потепление (похолодание) климата во все сезоны сопровождается увеличением (уменьшением) ЧМ. При этом чувствительность глобальной частоты молниевых вспышек к изменению приповерхностной температуры атмосферы для основной версии I-M модели получена равной $10\%/К$.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17–29–05098 с использованием результатов, полученных в рамках других проектов РФФИ и программ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. 687 p.
2. *Price C., Rind D.* // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1992. V. 97. № D9. P. 9919–9933.
3. *Mareev E.A., Volodin E.M.* // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. № 24. P. 9009–9016.
4. *Krause A., Kloster S., Wilkenskeld S., et al.* // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. 2014. V. 119. № 3. P. 312–322.
5. *Clark S.K., Ward D.S., Mahowald N.M.* // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. № 6. P. 2893–2901.
6. *Claussen M., Mysak L.A., Weaver A.J., et al.* // Clim. Dyn. 2002. V. 18. № 7. P. 579–586.
7. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
8. *Мазин И.П., Хргиан А.Х.* Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
9. *Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л.* Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 234 с.
10. *Eliseev A.V., Coumou D., Chernokulsky A.V., et al.* // Geosci. Model Develop. 2013. V. 6. № 5. P. 1745–1765.
11. *Мохов И.И.* Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 271 с.
12. *Cecil D.J., Buechler D.E., Blakeslee R.J.* // Atmos. Res. 2014. V. 135/136. P. 404–414.
13. *Sun B., Groisman P.Ya., Mokhov I.I.* // J. Clim. 2001. V. 14. № 8. P. 1864–1880.

14. Мохов И.И., Акперов М.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.
15. Norris J.R. // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2005. V. 110. № D8. D08206.

RELATIONSHIP OF LIGHTNING FLASHES FREQUENCY WITH STATISTICAL CHARACTERISTICS OF CONVECTIVE ACTIVITY IN THE ATMOSPHERE

A. V. Eliseev, A. N. Ploskov, A. V. Chernokulsky, Academician of the RAS I. I. Mokhov

Received July 3, 2018

A modification of the commonly used Price-Rind scheme for lightning flashes frequency (LFF), which can be used for calculations with large spatial and time steps, is developed. With such steps, the exponent in the relationship of LFF on convective cloud heights appears to be smaller by a factor of two over land and by one fourth over ocean in comparison to that in the original Price-Rind scheme. The modified version is implemented into the IAP RAS climate model (CM). The results of the lightning flash frequency simulations with the modified scheme agree better with the satellite data than those with the original one. In the IAP RAS CM, global warming (cooling) leads to LFF increase (decrease) in all seasons. The sensitivity of lightning flashes frequency to the surface air temperature change at the global level is estimated equal to 10%/K.

Keywords: lightning flashes, convective activity, statistical gamma-distribution, EMIC, IAP RAS CM, scenario RCP 8.5.

УДК 551.8:550.4

ПОЧВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ЮГЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Член-корреспондент РАН А. О. Алексеев*, П. И. Калинин,
Т. В. Алексеева, Г. В. Митенко

Поступило 26.07.2018 г.

Представлены результаты исследования закономерностей развития почв и природной среды степной зоны Восточно-Европейской равнины в различные культурно-хронологические этапы бронзового, железного веков и Средневековья (III тыс. до н.э. — II тыс. н.э.) на основе исследований палеопочв погребальных археологических памятников (курганов).

Ключевые слова: палеопочвы, палеоклимат, голоцен, геохимия, магнетизм окружающей среды, геостатистика, экологическое моделирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485183-87>

Без знаний экологических условий исторического прошлого невозможны прогноз долгосрочных ландшафтно-климатических изменений последствий геоэкологических изменений и выработка адекватной стратегии поведения в условиях ускоряющегося развития экологического кризиса. Прогноз не может быть корректным без всестороннего анализа закономерностей формирования основных природных компонентов прошлого, в том числе и погребённых почв. Климатические изменения существенно воздействуют на среду обитания растительных сообществ, и, как следствие, затрагиваются почвообразовательные процессы, процессы выветривания, биологический круговорот элементов, эмиссия и сток парниковых газов. Почвы и почвенный покров являются регулятором климата, его индикатором и памятью происходивших изменений. Климатические условия — один из основных факторов почвообразования, влияющий на процессы преобразования минералогического и химического состава почв и палеопочв, что обуславливает формирование палеопочвенных архивов, отражающих значимые этапы эволюции биосферы. Палеопочвенные исследования на территории Нижнего Поволжья активно проводятся начиная с 80-х годов XX в. Основы этих работ были заложены сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пушино) И.В. Ивановым, В.А. Демкиным и др. [1–4].

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской Академии наук,
г. Пушкино Московской обл.*

*E-mail: alekseev@issp.psn.ru

Последние годы развитие палеопочвоведения идёт по пути перехода из области качественного анализа к количественному подходу к палеореконструкциям. В настоящем сообщении представлены результаты исследований закономерностей развития почв и природной среды степной зоны Восточно-Европейской равнины. Хроноряды изучаемых почв, как правило, включают современные фоновые и погребённые под курганными насыпями почвы эпох бронзы (конец IV–II тыс. до н.э.), раннего железа (V в. до н.э. — IV в. н.э.) и Средневековья (XII–XIV вв. н.э.). Таким образом, мы имеем представительные педохроноряды, включающие почвы, погребённые ~5100, ~4900, ~4000, ~3600, ~1900, ~1750, ~700 лет назад (л.н.) и современную почву. Приводятся обобщённые данные количественных климатических реконструкций для более 300 разновозрастных палеопочв под курганными насыпями степной зоны Восточно-Европейской равнины. Основные объекты приурочены к различным геоморфологическим областям Нижнего Поволжья и Прикаспийской низменности (рис. 1). В почвенно-географическом отношении район исследований входит в сухостепную и пустынно-степную зоны соответственно с тёмно-каштановыми и каштановыми, светло-каштановыми и бурыми полупустынными почвами. Для проведения количественных реконструкций на палеопочвенных объектах археологических памятников (палеоосадки, палеотемпература, аридность климата) использован комплекс независимых методов (магнитные, минералогические, геохимические методы, изотопная геохимия), отражающих состояние твёрдой фазы почв. Одна

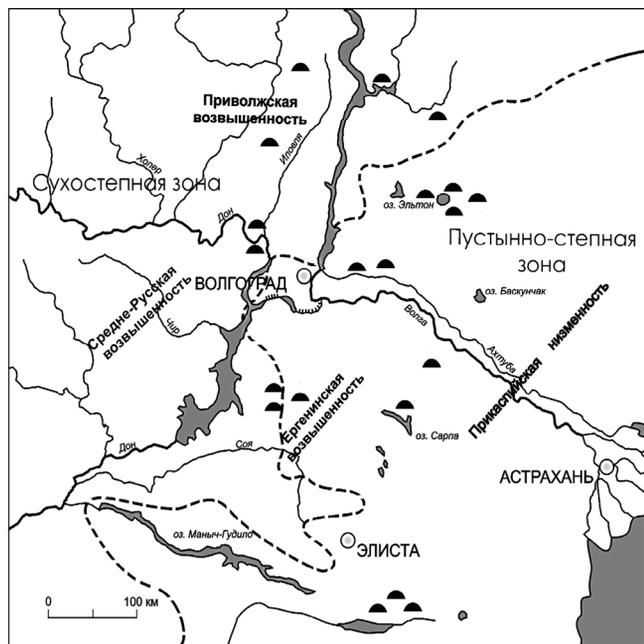


Рис. 1. Карта-схема района исследований степной зоны Восточно-Европейской равнины. 1 — курганные группы с хронориями палеочувств, 2 — граница природных зон.

из ключевых задач настоящего исследования состояла в количественной оценке сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины, обусловленного климатическими вариациями.

Химический состав образцов изучен методом рентгенфлуоресцентного анализа (SPECTROSCAN МАКС-GV) по методике измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах. Среднюю пробу измельчали до пудры и помещали в специальную кювету. Стандартная навеска была не менее 200 мг. Количественные калибровки производились с помощью комплекта государственных стандартных образцов состава. Показатель магнитной восприимчивости измеряли в лабораторных условиях на приборе "КАРРАБРИДЖ KLY-2".

На протяжении голоцена в степной зоне неоднократно отмечалось развитие аридизации (остепнение, опустынивание) ландшафтов. Увеличение частоты засух, сокращение количества выпадающих осадков (постоянное или временное), возрастание температур выше среднего многолетнего уровня, периодическое преобладание испарения над увлажнением приводили к уменьшению степени увлажнённости обширных территорий, а также вызванное этим сокращение биологической продуктивности

экосистем свидетельствовало об аридизации суши [5]. Увлажнение территории вместе с температурными условиями определяет тип растительности и всего географического ландшафта. Для количественной характеристики степени увлажнения используются разнообразные показатели (индексы, коэффициенты) сухости или влажности климата. Степень аридности (сухости) климата характеризует индекс аридности. Различными авторами предложено много формул для определения индекса аридности. В большинство из них входят количество осадков в различные сроки, температура и испарение. Показатель, наиболее подходящий с точки зрения возможных палеоклиматических реконструкций, — индекс аридности по де Мортонну [6]. Это частное от деления годовой суммы осадков в см (R) на сумму средней годовой температуры (t), увеличенной на 10, т.е. $R/(t + 10)$.

По индексу аридности засушливые регионы мира с подразделяются на три зоны: аридную, семиаридную и сухую субгумидную. В аридной зоне (северные пустыни и южные полупустыни) годовое количество осадков 100–200 мм, индекс равен 0–10, зональная растительность солянково-полынная, почвы бурые пустынные. Семиаридная зона (северные полупустыни или опустыненные степи): среднее годовое количество осадков 200–400 мм, индекс аридности 10–20, зональная растительность злаково-полынная, почвы светло-каштановые. Сухая субгумидная зона, сухие степи: количество осадков 400–600 мм, индекс аридности 20–25, зональная растительность бедно-разнотравная ксерофильно-злаковая, почвы каштановые и южные черноземы [6, 7]. На сегодняшний день существует возможность реконструировать количество осадков и температуру по палеопочвенным параметрам. Следовательно, мы можем рассчитать индекс аридности по де Мортонну и количественно проследить тренд аридизации климата.

Магнитные свойства степных почв связаны с биоклиматическими условиями. Содержание почвенного (биогенного) магнетита является "магнитной записью", которая сохраняет информацию об условиях окружающей среды степей. Исследование магнитных свойств и магнитной минералогии современных степных почв показало прямую зависимость прироста величины магнитной восприимчивости материала почвенного профиля относительно почвообразующей породы от среднегодового количества осадков ($R^2 > 0,9$). Таким образом был реализован новый подход для реконструкции количества атмосферных осадков в разные исторические и геологические эпохи по результатам изучения маг-

нитной минералогии палеопочв степей в голоцене. Это позволило количественно рассчитать величины атмосферных осадков на изучаемой территории в прошлые исторические эпохи [8, 9]. Среднегодовое значение атмосферных осадков (MAP) (степная зона европейской части России) определяется следующим уравнением:

$$\text{MAP}_{\text{MS}} = 86,4 \ln(X_c - X_c) + 90,1,$$

где $(X_c - X_c)$ — прирост магнитной восприимчивости в результате почвообразования.

Анализ данных для различных регионов планеты и математическое моделирование данных, проведённое в последние годы Б. Махер с соавторами [10], подтвердили правомочность этого подхода к количественным реконструкциям палеоклимата для степной зоны юга Восточно-Европейской равнины (интервал осадков 300–700 мм/год). Статистическая обработка ранее собранного для современных почв степной зоны данных с целью получения эмпирических климатических зависимостей продемонстрировала связь почвенных параметров с индексом де Мартонна (коэффициент корреляции для прироста магнитной восприимчивости в почвенном профиле $R^2 = 0,75$; содержание гумуса в почве $R^2 = 0,81$).

На основе результатов исследований большого набора почв (более 300 почвенных профилей), погребённых под разновозрастными насыпями археологических памятников степей юго-востока Восточно-Европейской равнины, к настоящему времени сформировано представление о климатических изменениях, коснувшихся этого региона. Реконструкции показали, что в конце IV–I четверти III тыс. до н.э. климатические условия были аридные современных. На рубеже III–II тыс. до н.э. отмечается наименьшая среднегодовая норма атмосферных осадков (около 300 мм/год). На I век н.э. приходился микроплювиал (около 400 мм/год, который во II–III вв. н.э. сменился очередным засушливым периодом (около 350 мм/год)). В эпоху развитого Средневековья (XII–XIV вв. н.э.) существовал климатический оптимум с максимумом увлажнения за последние 5 тыс. лет (около 450 мм/год). Сопоставление полученных результатов для палеопочв степей европейской части России с климатическими записями для регионов Ближнего Востока свидетельствует о синхронизации глобальных планетарных климатических колебаний [4, 9].

Кроме того, в настоящее время нами продемонстрирована возможность количественной оценки палеотемператур для голоценовых палеопочв на ос-

нове почвенного геохимического индекса (PWI). Геохимический подход базируется на эмпирических зависимостях коэффициентов выветривания, связывающих изменения валового химического состава почвенной массы и её элементов с климатическими факторами (палеоосадки — MAP, палеотемпературы — MAT) [11].

Калибровки, полученные на основании анализа современных почв различных климатических зон, выявили следующие зависимости [12]:

$$\text{MAT} = -2,74 \ln(\text{PWI}) + 21,39.$$

PWI (палеопочвенный индекс выветривания) предложен и используется как показатель палеотемператур:

$$\text{PWI} = [(4,20\text{Na}) + (1,66\text{Mg}) + (5,54\text{K}) + (2,05\text{Ca})] \cdot 100.$$

Использование предлагаемого палеопочвенного термометра для степной зоны Восточно-Европейской равнины было апробировано на палеопочвах курганных археологических памятников исследуемого региона. Полученные результаты коррелируют с изменениями палеотемператур голоцена по ледникам Гренландии и подтверждают получаемые величины градиента палеотемператур по палеопочвам (рис. 2). Мы использовали данные, полученные от наиболее известной из пробурённых в Гренландии за последние четверть века скважины GISP2 [13]. Анализ состояния ледовых кернов даёт полную картину об изменениях климата Земли и состоянии атмосферы в прошлом. Температурная кривая позволяет представить климатические ситуации в различные периоды “исторического” времени, к которому приурочены наши исследуемые объекты. Из графиков совершенно однозначно следует, что интервал 3100–3600 л.н. был весьма тёплым, но затем его сменило глобальное похолодание, продолжавшееся вплоть до начала прошлого века. Картина палеопочвенных температурных флуктуаций в отдельных случаях достаточно чётко повторяет данные температурной кривой GISP2. Для курганной группы “Калмыкия” с детальными радиоуглеродными датировками, охватывающими период от 4000 до 4500 тыс. л.н., мы наблюдаем полное повторение данных. Изменения среднегодовых осадков, как отмечалось выше, определяли для каждого почвенного профиля разновозрастных погребённых почв исследуемой территории и рассматривали в локальном контексте. Предлагаемый подход позволяет рассчитать гидротермический показатель индекса аридности по Де Мортонну и оценить количественно сдвиги границ климатических зон на про-

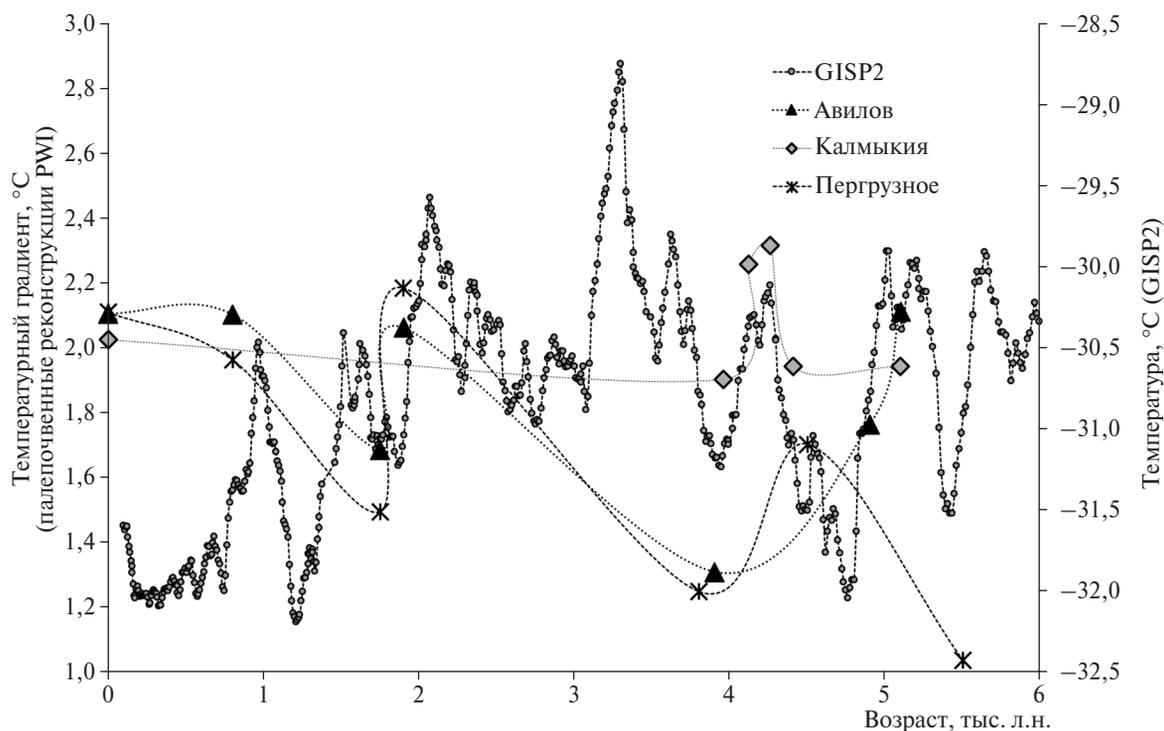


Рис. 2. Пример реконструкции палеотемператур по палеопочвенным данным для хронологий трёх курганных групп в сравнении с палеотемпературами голоцена, реконструированными по кернам ледников Гренландии (GISP2).

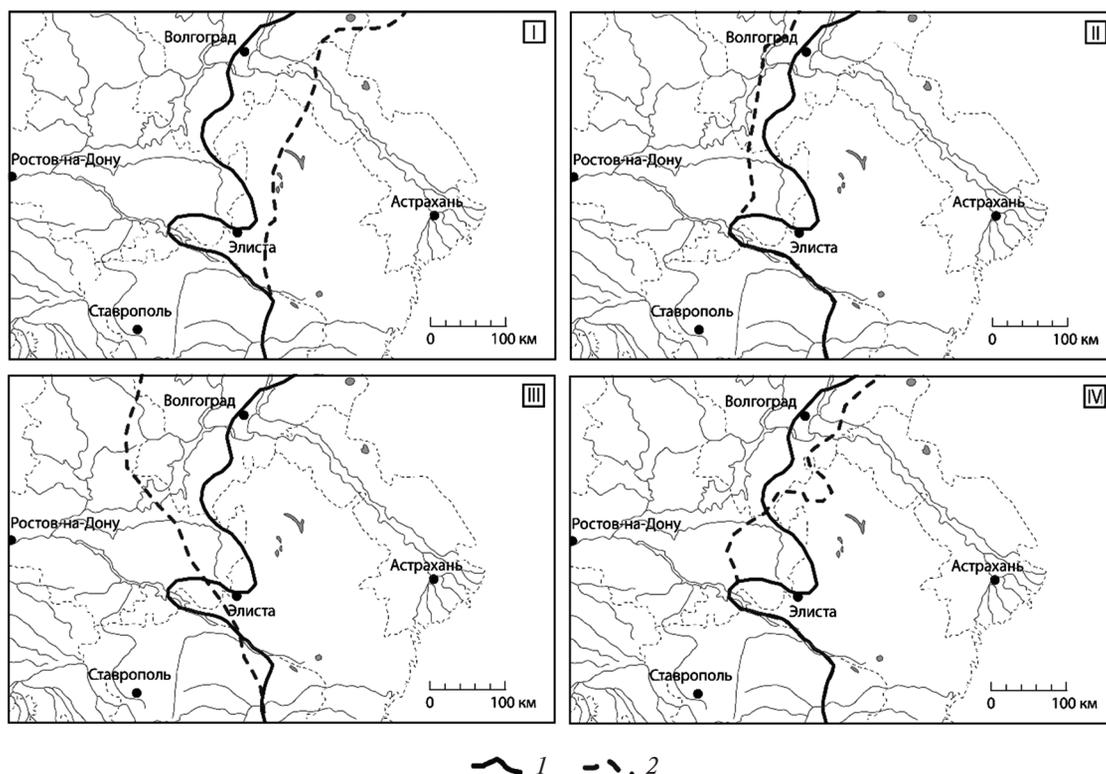


Рис. 3. Результаты ГИС-моделирования сдвига границ природных зон на юге Восточно-Европейской равнины в разные хроноинтервалы голоцена по палеопочвенным: 1 — современная граница сухостепной и пустынно-степной зоны; 2 — реконструированное положение границы, хроноинтервалы, л.н.: I — 600–700; II — 1600–1700; III — 3600–4000; IV — 5000–6000.

тяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины (рис. 3). Полученные результаты ГИС-моделирования демонстрирует сдвиги природной зоны с амплитудой 200–300 км.

На основании полученных данных возможно детализировать палеоэкологическую периодизацию позднего голоцена для степной и лесостепной зон Восточной Европы с определением кризисных и оптимальных условий среды обитания, ресурсной базы степей и выявлением их корреляции с культурно-историческими процессами и особенностями хозяйственной деятельности древнего населения. Результаты исследования палеопочв голоцена и палеоклиматические параметры могут также быть использованы для создания сценариев будущих изменений семиаридных степных экосистем юга России, связанных с глобальными изменениями климата и антропогенным влиянием. Ретроспективный анализ палеопочв с прогнозными целями необходимо осуществлять с учётом смены доминантов почвообразовательных факторов современности. Современное и ближайшее будущее почвообразовательного процесса в степной зоне определяется изменённым сочетанием факторов в сравнении с прошлым — мощнейшим прямым воздействием человека, определяемым сельскохозяйственным использованием почвенных ресурсов степной зоны.

Источники финансирования. Работа выполнена по теме Государственного задания № 0191–2019–048 и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18–04–00800).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демкин В.А., Рысков Я.Г., Алексеев А.О., Олейник С.А., Губин С.В. Палеопедологическое изучение памятников степной зоны // Изв. АН. Сер. геогр. 1989. № 6. С. 40–51.
2. Иванов И.В. Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 143 с.
3. Демкин В.А., Ельцов М.В., Алексеев А.О., Алексеева Т.В. и др. Развитие почв Нижнего Поволжья за историческое время // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1486–1497.
4. Алексеев А.О., Алексеева Т.В. Оксидогенез железа в почвах степной зоны. М.: Геос, 2012. 204 с.
5. Ковда В.А. Аридизация суши и борьба с засухой. М.: Наука, 1977. 272 с.
6. The Encyclopedia of Earth Sciences / The Encyclopedia of Climatology. V. XI / J.E. Oliver, R.W. Fairbridge Eds. N.Y.: van Nostrand Reinold, 1987. 103 p.
7. Виноградов Б.В. Опустынивание — проблема степной зоны России // Степ. бюл. 1999. № 3/4. С. 55–58.
8. Maher B.A., Alekseev A.O., Alekseeva T.V. Climate Dependence of Soil Magnetism Across the Russian Steppe: Significance for Use of Soil Magnetism as a Palaeoclimatic Proxy // Quatern. Sci. Revs. 2002. V. 21. P. 1571–1576.
9. Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin V. Late Holocene Climate Reconstructions for the Russian Steppe, Based on Mineralogical and Magnetic Properties of Buried Palaeosols // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2007. V. 249. P. 103–127.
10. Maher B., Possolo A. Statistical Models for Use of Palaeosol Magnetic Properties as Proxies of Palaeorainfall // Global and Planet. Change. 2013. V. 12. P. 280–287.
11. Sheldon N.D., Tabor N.J. Quantitative Paleoenvironmental and Paleoclimatic Reconstruction Using Palaeosols // Earth-Sci. Rev. 2009. V. 95. P. 1–52.
12. Gallagher T.M., Sheldon N.D. A New Paleothermometer for Forest Paleosols and its Implications for Cenozoic Climate // Geology. 2013. V. 41. P. 647–650.
13. Alley R.B. GISP2 Ice Core Temperature and Accumulation Data. IGBP PAGES / World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2004–013.

SOIL PARAMETERS FOR QUANTITATIVE ESTIMATION OF LATE HOLOCENE CLIMATE CHANGES IN THE SOUTHERN EAST EUROPEAN PLAIN

Corresponding Member of the RAS A. O. Alekseev, P. I. Kalinin, T. V. Alekseeva, G. V. Mitenko

Received July 26, 2018

The results of studies of the regularities of evolution of soils and the environment in the steppe zone of the East European Plain are presented. Different culture-based chronological stages for the Bronze Age, Iron Age, and Middle Ages (3rd millennium BC–2nd millennium AD) are considered on the basis of buried soils at archeological monuments (burial mounds).

Keywords: palaeosols, palaeoclimate, Holocene, geochemistry, environmental magnetism, geostatistics, ecological modeling.

УДК 551.345;550.46

СОДЕРЖАНИЕ И ЭМИССИЯ МЕТАНА В ДОМИНАНТНЫХ ЛАНДШАФТАХ ТИПИЧНОЙ ТУНДРЫ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА

А. А. Васильев^{1,2,**}, академик РАН В. П. Мельников^{1,2},
П. Б. Семенов³, Г. Е. Облогов^{1,2,*}, И. Д. Стрелецкая⁴

Поступило 20.09.2018 г.

Определено содержание метана в доминантных ландшафтах типичной тундры Западного Ямала. Наиболее высокая концентрация метана в сезонно-талом слое присуща тундровым болотам, обводнённым днищам логов, оврагов и полигональным тундрам. В них концентрация метана до 5000 ppm, в остальных ландшафтах концентрация метана не превышает 300 ppm. Таким образом, только болота, полигональные тундры и днища логов, занимающие ~30–40% территории, — существенные источники метана в зоне типичной тундры. Выполнены измерения эмиссии метана в атмосферу. На пике летней эмиссии суточный поток метана в болотах до 14,4 мг/м² (20,3 мл/м²).

Ключевые слова: Западный Ямал, типичная тундра, метан, концентрация, эмиссия метана.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485188-92>

В связи с потеплением климата в литературе активно обсуждают проблему эмиссии метана в атмосферу за счёт деградации мерзлоты и её влияния на прогнозируемые климатические изменения [3, 4, 9]. Оценки возможных последствий выделения метана при деградации мерзлоты во многом расходятся. По мнению многих исследователей [6, 8], дополнительная эмиссия метана из протаивающих субаквальных многолетнемерзлых пород может быть серьёзным фактором изменения климата в Арктике. Напротив, по оценкам О.А. Анисимова [9], эмиссия метана за счёт деградации мерзлоты в континентальных условиях и на шельфе не может существенно влиять на климат. Столь разные оценки последствий дополнительной эмиссии метана из протаивающих мерзлых толщ в первую очередь связаны с недостаточной изученностью содержания метана в сезонно-талом слое и верхних горизонтах многолетнемерзлых пород, которые и являются источником эмиссии биогенного метана в атмосферу [1]. Продуцирование метана в сезонно-талом слое происходит при положительной температуре в анаэробных условиях при наличии достаточного

количества органического углерода в доступных формах. В засоленных отложениях метан может продуцироваться и при отрицательной температуре, выше температуры фазовых переходов [1].

Таким образом, цель работы — определить содержание метана в сезонно-талом слое и верхнем горизонте мерзлых пород в ландшафтах типичной тундры и экспериментально оценить пиковые значения потока метана в атмосферу. Исследования проводили в зоне типичной тундры в районе полярной станции Марре-Сале (Западный Ямал) на расчленённой поверхности третьей морской террасы. Участок исследований расположен в зоне сплошного распространения засоленных многолетнемерзлых пород. Мощность твёрдомёрзлой толщи до 90 м, среднегодовые температуры на глубине нулевых годовых амплитуд от –3,5 до –6,0 °С. В зависимости от типа ландшафтов глубина сезонного оттаивания 0,4–1,8 м. Дополнительно содержание и изотопный состав метана в сезонно-талом слое изучали на заболоченной низкой пойме р. Марре-Яха и морской лаиде.

Ландшафтная структура типичной тундры в районе Марре-Сале изучали на основе дешифрирования аэрофотоснимков масштаба 1:2000 и наземных маршрутных наблюдений. Доминантные ландшафты в ранге урочищ здесь, %: дренированные тундры (33), увлажнённые тундры (17), болота (16), овраги (11), дренированные песчаные поля (11), заболоченные полигональные тундры (9). Остальные ландшафты имеют подчинённое значение. Каждый тип ландшафтов в ранге урочища характеризуется специфическими морфологией, литогенной основой,

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук

² Тюменский государственный университет

³ Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*E-mail: oblogov@mail.ru

**E-mail: al.a.vasiliev@gmail.com

составом пород сезонно-талого слоя, влажностным режимом, типом тундровых почв, растительностью, температурным режимом мерзлоты, глубиной сезонного оттаивания.

Для отбора образцов в каждом изучаемом ландшафте в 2016, 2017 гг. проходили узкие шурфы на всю мощность сезонно-талого слоя с заглублением в мерзлоту на 5–10 см. В 2016 г. опробование проводили в конце сезона оттаивания (третья декада августа), в 2017 г. — во второй—третьей декаде июля, что соответствует пику эмиссии метана в атмосферу. Из стенок шурфов методом режущего кольца отбирали цилиндрические образцы грунта объёмом 30 см³ и помещали в 150-миллиметровые шприцы. Дегазацию отобранных образцов выполняли методом “head space” [1]. Из шприцев пробы газа перекачивали в 20-миллиметровые стеклянные флаконы с водно-солевым затвором и в таком виде транспортировали в лабораторию. Все газовые пробы дублировали. Содержание метана в газовой фазе определяли в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН на газовом хроматографе ХПМ.4 (Россия) с плазменно-ионизационным детектором и в лаборатории ФГБУ “ВНИИокеангеология” на газовом хроматографе SHIMADZU GC. Всего отобрано 84 образца для определения содержания метана. Для 26 проб газа с высоким содержанием метана (> 0,1%) в Институте микробиологии РАН на изотопном масс-спектрометре определены значения изотопов $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$. Определение изотопов $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ и значений изотопа водорода в метане $\text{D}(\text{CH}_4)$ в шести пробах газа проведено в лаборатории ISOLAB B.V. (Нидерланды).

Параллельно отбирали образцы для изучения гранулометрического состава, влажности, плотности, содержания органического углерода.

В конце июля 2017 г. были проведены измерения потоков метана в ландшафтах дренированной, увлажнённой, полигональной тундры, болоте, заболоченном днище оврага. Использовали статический камерный метод [7]. Образцы газа из камеры отбирали в начале установки камеры и каждый час в течение 3–4 ч. Концентрацию метана в газовых пробах также определяли в лаборатории ФГБУ “ВНИИокеангеология”. Одновременно в ходе наблюдений измеряли температуру на поверхности почвы и на глубине 10 см.

Анализ полученных данных показывает, что содержание метана в изученных ландшафтах типичной тундры меняется в очень широких пределах (рис. 1). В сезонно-талом слое дренированных и увлажнённых

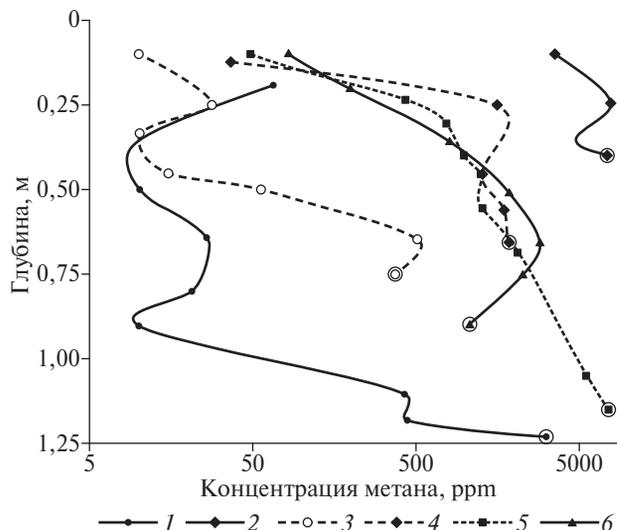


Рис. 1. Распределение концентраций метана по глубине в доминантных ландшафтах типичной тундры. 1 — дренированная тундра, 2 — полигональная заболоченная тундра, 3 — увлажнённая тундра, 4 — днище лога, 5 — болото, 6 — низкая пойма. Кружком обведены данные по пробам, отобранным в мёрзлых подстилающих породах.

ных тундр и песчаных полей содержание метана 5–300 ppm. В обводнённых и заболоченных ландшафтах полигональной тундры, болотах, U-образных днищах логов, оврагов содержание метана в сезонно-талом слое до 1500–5000 ppm. Ясно, что ландшафты с низким содержанием метана не могут служить более или менее заметным источником эмиссии метана в атмосферу. Напротив, ландшафты с высокими содержаниями метана — существенные источники эмиссии. Учитывая ландшафтную структуру, можно заключить, что только ~30–40% территории типичной тундры — источники эмиссии метана в атмосферу.

Обращает на себя внимание увеличение содержания метана с глубиной. При этом максимальные содержания характерны для мёрзлых пород, слагающих промежуточный слой, непосредственно под тальными породами. Это наблюдается во всех типах ландшафтов. Повышенное содержание метана в породах промежуточного слоя, вероятно, можно объяснить вытеснением метана от фронта фазовых переходов при осеннем промерзании сезонно-талого слоя и последующей консервацией вытесненного метана в промежуточном слое. Такое же характерное распределение метана с повышенным содержанием метана в промежуточном слое наблюдали в районе Колымы в совершенно других климатических, геокриологических, ландшафтных условиях [5]. Вероятно, этот эффект проявлен повсеместно.

Анализ изотопного состава метана из сезонно-талого слоя показывает, что он характеризуется более тяжёлым изотопным составом по сравнению с мёрзлыми толщами. Средняя величина $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ для метана сезонно-талого слоя по 26 образцам $-63,6\text{‰}$, стандартное отклонение $\pm 5,6\text{‰}$, в то время как в мёрзлых породах $-68,6\text{‰}$ и $\pm 7,3\text{‰}$ соответственно [2]. Изменение изотопного состава метана по глубине представлено на рис. 2. Как видно из рисунка, наблюдается закономерное утяжеление изотопного состава с глубиной с приближением к изотопному составу метана в мёрзлых толщах. Это позволяет утверждать, что в процессе эмиссии метана из сезонно-талого слоя в атмосферу происходит фракционирование газа. В первую очередь за счёт большей подвижности в атмосферу эмитирует метан с более лёгким изотопным составом, а в сезонно-талом слое остаётся метан с более тяжёлым изотопным составом. Из этого следует, что более тяжёлый изотопный состав метана в сезонно-талом слое не может однозначно свидетельствовать о проникновении глубинного метана в сезонно-талый слой. Несмотря на некоторые изменения в изотопном составе метана в сезонно-талом слое вследствие фракционирования, несомненно, метан имеет бактериальный генезис и вырабатывается анаэробными бактериями. Это подтверждает и изотопный состав метана $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ и $\text{D}(\text{CH}_4)$, который позволяет уверенно отнести метан к бактериальному, а также тем обстоятельством, что высокие содержания метана наблюдаются только в обводнённых ландшафтах с анаэробными условиями. Таким образом, метан в мёрзлых отложениях и в сезонно-талом слое имеет бактериальный генезис [2].

Определение эмиссии метана из сезонно-талого слоя проведено в третьей декаде июля 2017 г., кото-

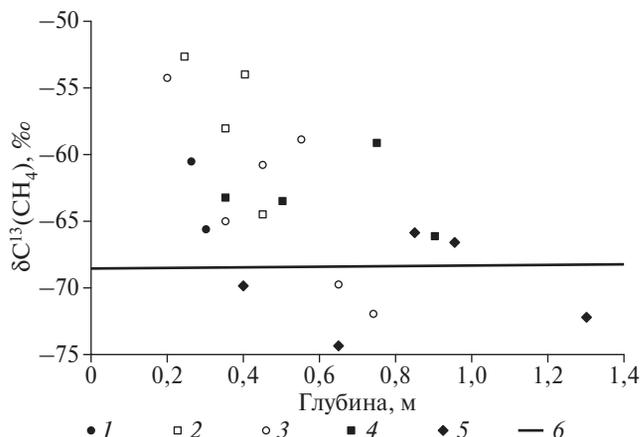


Рис. 2. Распределение значений $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ по глубине. 1 — днище лога, 2 — увлажнённая тундра, 3 — болото, 4 — низкая пойма, 5 — морская лаيدا, 6 — среднее значение $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ для многолетнемёрзлых пород.

рое соответствует максимальным (пиковым) потокам метана в атмосферу. Характеристики ландшафтов и условия проведения наблюдений приведены в табл. 1.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена динамика изменения концентрации метана во времени в стационарных камерах для трёх контрастных по уровню эмиссии метана ландшафтов: болото с высокой эмиссией, днище лога со средней эмиссией, дренированная тундра с нулевой эмиссией. Данные о скорости накопления метана во времени в стационарных камерах при известных площади и объёме камер позволяют рассчитать потоки метана.

Измерения показали, что максимальный поток метана в атмосферу наблюдается в ландшафтах болот — $14,4 \pm 3,55 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$ ($20,3 \pm 5,07 \text{ мл/м}^2 \cdot \text{сут}$). В обводнённых днищах оврагов и логов поток метана составил $3,1 \pm 0,89 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$ ($4,43 \pm 1,27 \text{ мл/м}^2 \cdot \text{сут}$). Однократное измерение потока метана в заболочен-

Таблица 1. Характеристика условий измерения потоков метана

	Дренированные тундры (33%)*	Увлажнённые тундры (17%)	Болота (16%)	Овраги и логи (11%)	Песчаные поля (11%)	Заболоченные полигональные тундры (9%)
Состав	Супесь	Суглинок	Супесь	Супесь	Песок	Суглинок
Глубина сезонного оттаивания, м	1,2	0,7	0,7	0,6	1,8	0,4
Объёмная влажность, %	30,3	36,4	48,2	47,2	25,6	46,4
Температура поверхности, °С	6–7	7–9	7–8	6–8	8–9	7–9
Содержание органического углерода, %	0,45	1,26	0,68	4,5	0,34	1,12
Среднее содержание метана в сезонно-талом слое, ppm	121	328	2200	1590	86	5846
Концентрация метана в воздухе над поверхностью, ppm	2,1	2,2	4,02	3,82	—	6,67

Примечание. В скобках доли ландшафтов к общей площади.

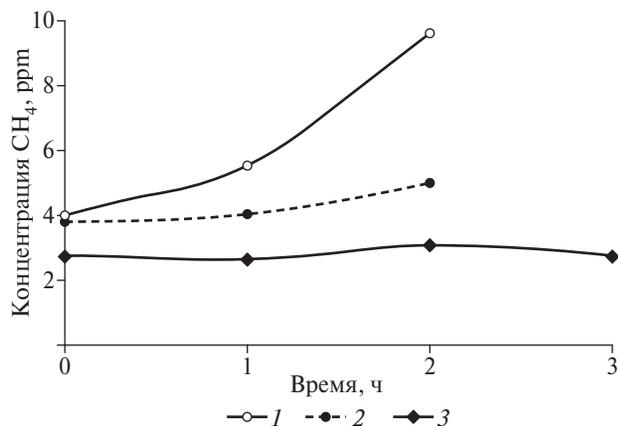


Рис. 3. Изменение концентрации метана во времени в статической камере. 1 — болото, 2 — днище лога, 3 — дренированная тундра.

ной полигональной тундре показало, что в этом типе ландшафтов поток может достигать $100 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$, однако повторные измерения не были проведены, поэтому подтвердить достоверность этой оценки пока не удалось. В остальных типах ландшафтов потоки метана в атмосферу пренебрежимо малы. Таким образом, потоки метана в типичных тундрах Западного Ямала примерно в 1,5–2,0 раза меньше, чем в тундрах Аляски [4].

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Содержание метана в сезонно-талом слое доминантных ландшафтов типичных тундр отличается на порядки. В заболоченных полигональных тундрах, болотах, днищах оврагов, логов концентрация метана до 1600–5000 ppm, в то время как в дренированных, увлажнённых тундрах и песчаных полях концентрация метана не более 90–300 ppm.

В типичной тундре Западного Ямала только ~30–40% территории можно считать существенными источниками эмиссии метана в атмосферу.

В процессе эмиссии метана в атмосферу происходит естественное фракционирование метана по изотопному составу. В сезонно-талом слое на-

капливаются более тяжёлые изотопы по сравнению с изотопным составом метана в подстилающих мёрзлых породах.

Максимальные потоки метана в атмосферу в болотах и днищах оврагов, логов, пиковые значения до $14,4 \pm 3,55$ и $3,1 \pm 0,89 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$ соответственно. Измеренные потоки метана в типичных тундрах Западного Ямала примерно вдвое ниже, чем на Аляске.

Источники финансирования. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 18–05–60004, ландшафтная структура типичных тундр изучена в рамках гранта РФФИ 18–55–11005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А., Мельников В.П., Стрелецкая И.Д., Облогов Г.Е. // ДАН. 2017. Т. 476. № 2. С. 213–216.
2. Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Семенов П.Б., Ванштейн Б.Г., Ривкина Е.М. // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 65–77.
3. AMAP Assessment 2015. Methane as an Arctic Climate Forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2015. P. 139.
4. Euskirchen E.S., Bret-Harte M.S., Shaver G.R., Edgar C.W., Romanovsky V.E. // Ecosystems. 2017. V. 20. P. 960–974. DOI: 10.1007/s10021-016-0085-9.
5. Kraev G., Schulze E.-D., Kholodov A., Chuvilin E., Rivkina E. // Atmosphere. 2017. V. 8. № 6. DOI: 10.3390/atmos8060105.
6. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E.S., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 3185–3204.
7. Nozhevnikova A., Glagolev M., Nekrasova V., Einola J., Sormunen K., Rintala J. // Water Sci. Technol. 2003. V. 48. № 4. P. 45–52.
8. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. // Science. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
9. Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. Permafrost Degradation. In: Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. N.Y.: Elsevier, 2014. P. 303–343.

METHANE CONCENTRATION AND EMISSION IN DOMINANT LANDSCAPES OF TYPICAL TUNDRA OF WESTERN YAMAL

**A. A. Vasiliev, Academician of the RAS V. P. Melnikov, P. B. Semenov,
G. E. Oblogov, I. D. Streletskaya**

Received September 20, 2019

Methane concentration in dominant landscapes of typical tundra of Western Yamal has been measured. The highest methane content in the active layer was measured in tundra bogs, wet gully bottoms, and polygonal tundra. Within these landscapes, methane concentration reaches 5000 ppm, while in other landscapes it does not exceed 300 ppm. Thus, only bogs, polygonal tundra, and gully bottoms, which occupy approximately 30–40% of the area, are the main sources of methane emission in the typical tundra zone. Measurements of methane emission to the atmosphere have been performed. During the summer maximum of emission, daily methane flux in bogs reaches 14.4 mg/m² (20.3 ml/m²).

Keywords: Western Yamal, typical tundra, methane, concentration, methane emission.

УДК 632.153(268)

ТЕХНОГЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОГО ПОЛЯРНОГО БАСЕЙНА И СМЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ АРКТИКИ

Академик РАН Г. Г. Матишов^{1,2}, Н. Е. Касаткина^{1,*}, И. С. Усягина¹

Поступило 16.05.2018 г.

Выполнена оценка современной радиационной обстановки в Центральном Полярном бассейне и российских морях Северного Ледовитого океана по данным 2013–2017 гг. Выявлены статистически значимые различия средней объёмной активности ^{137}Cs в поверхностном слое вод. Отмечена тенденция уменьшения загрязнённости морской среды в направлении с запада на восток. Максимальные концентрации ^{137}Cs характерны для Баренцева, Карского морей. Меньше всего загрязнены воды морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, наиболее удалённых от европейских источников техногенных радионуклидов.

Ключевые слова: вода, Северный Ледовитый океан, арктические моря, загрязнение, искусственные радионуклиды.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485193-98>

Проблема трансграничных миграций радиоактивного вещества, попавшего в морские экосистемы из наземной, воздушной, водной сред, по-прежнему привлекает внимание многих исследователей. В Северном Ледовитом океане после испытаний атомного оружия в 1950–1960-х годах постоянно обнаруживали изотопы ^{137}Cs , ^{90}Sr — продукты деления ядер ^{235}U , ^{239}Pu [1]. В 1970–1980-е годы воды Арктического бассейна стали содержать изотоп ^{134}Cs — маркер трансокеанического переноса сбросов английского радиохимического предприятия “Селлафилд” и радиоактивных атмосферных выпадений после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. [2].

Первые масштабные исследования искусственной радиоактивности морской среды вблизи Северного полюса Земли выполнены на полярных станциях: в 1974 г. на ст. Logex, дрейфовавшей вдоль 89° с.ш. [3]; в 1983 г. на ст. Cesag, развёрнутой в районе поднятия Альфа на 87° с.ш. [4]. Значительный массив данных о содержании искусственных радионуклидов в центре Арктического бассейна собран в ходе экспедиции шведского ледокола “Оден” в 1994 г. [5]. Анализ опубликованных карт распределения антропогенных изотопов [5, 6] и баз данных радиоактивного загрязнения АМАР (Arctic Monitoring and Assessment Programme, Арктический совет) и MARI S (Marine Information System, МАГАТЭ, <https://maris.iaea.org>) показал, что в последние два

десятилетия радиоактивность вод Центрального Полярного бассейна вблизи Северного полюса Земли практически не изучали. В связи с этим результаты радиоэкологических исследований, проведённых впервые в XXI в. непосредственно на акватории Северного полюса, приобретают особую актуальность.

Цель нашей работы — анализ современных закономерностей радиоактивного загрязнения в водах Центрального Полярного бассейна и сопредельных акваторий, Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей, а также моря Лаптевых.

Материалы по загрязнению вод Центрального Полярного бассейна собраны в экспедиции на атомном ледоколе “50 лет Победы” по маршруту г. Мурманск—Северный полюс 15–25 августа 2017 г. Пробы воды для определения гидрологических, радиометрических параметров отбирали на восьми комплексных станциях (рис. 1). Оценка радиоактивного загрязнения других российских морей Северного Ледовитого океана (Баренцево, Карское, Восточно-Сибирское моря, море Лаптевых) выполнена по данным, полученным в комплексных экспедициях ММБИ КНЦ РАН на нис “Дальние Зеленцы”, на дизель-электроходах “Мончегорск”, “Талнах”, “Надежда”, “Норильский Никель” в 2013–2017 гг. (рис. 1).

Концентрирование радионуклидов Cs из морской воды проводили из пробы объёмом 100 л на целлюлозно-неорганическом сорбенте “Анфеж”. Измерения полученных счётных образцов выполняли на гамма-спектрометре “InSpektor-2000” фирмы “Canberra”, США. Для определения содержания ^{90}Sr

¹ Мурманский морской биологический институт Российской Академии наук

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской Академии наук, Ростов-на-Дону

*E-mail: kasatkina@mmbi.info

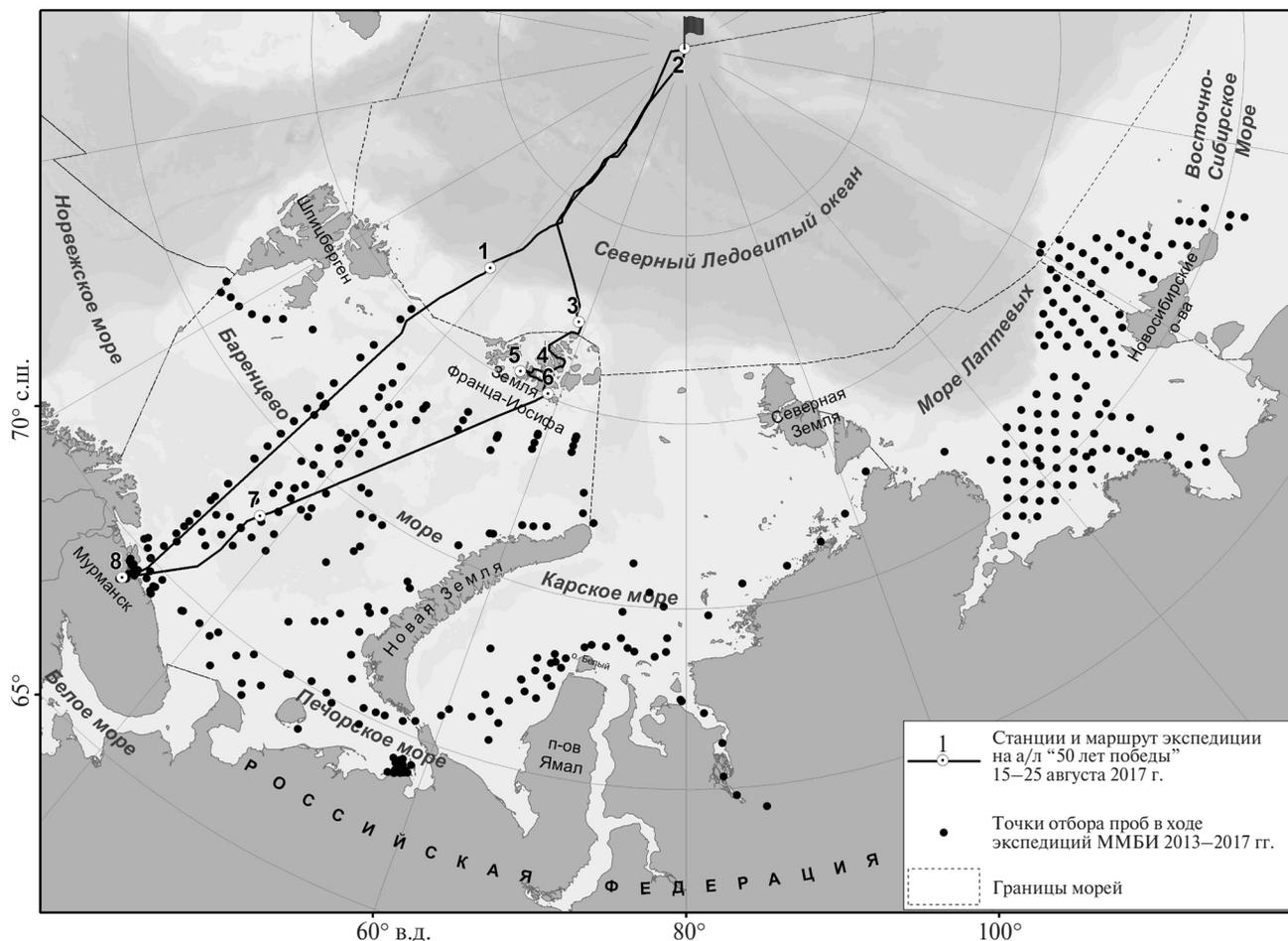


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды для исследования уровней искусственной радиоактивности в арктических морях, 2013–2017 гг.

пробы воды объёмом 20 л подвергали радиохимической обработке оксалатным методом с последующим измерением счётного образца на жидкосцинтилляционном бета-радиометре “LS 6500” фирмы “Beckman coulter”, США. Статистические расчёты выполнены с помощью специализированной программы SPSS Statistics.

Важнейшую роль в перемещении радиоактивного вещества в Северном Ледовитом океане играют атлантические воды, поступающие в акваторию через пролив Фрама. Эти тёплые воды и материковый сток участвуют в формировании термохалинной структуры и ледовых условий в Полярном бассейне. Стратификация вод имеет многослойную структуру. Верхний слой (до 100–200 м) характеризуется холодными распреснёнными водами, которые покрыты морскими льдами. Ниже галоклина (200–600 м) залегает слой тёплых и солёных атлантических вод.

Во второй половине августа 2017 г. акватория Северного Ледовитого океана в районе Северного

полюса представляла собой заснеженную ледовую пустыню. Температура воздуха до -8° , морской воды $-1,6^{\circ}$. От окраин Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена в направлении Северного полюса нарастало распреснение водных масс (табл. 1). Поверхностные воды в разводе на акватории Северного полюса отличались наибольшим распреснением (30,42‰).

Таблица 1. Объёмные активности ^{137}Cs , ^{90}Sr в поверхностных водах Центрального Полярного бассейна и Баренцева моря по результатам экспедиции на а/л “50 лет Победы” (15–25 августа 2017 г.)

№ станции	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	S, ‰	^{137}Cs , Бк/м ³	^{90}Sr , Бк/м ³
1	82°10'	38°014'	32,92	—	< 0,1
2	89°57'	39°071'	30,42	2,0 ± 0,2	2,1 ± 0,3
3	82°11'	58°35'	31,54	—	0,7 ± 0,1
4	80°39'	56°57'	34,08	—	1,5 ± 0,3
5	80°20'	52°49'	34,12	—	0,7 ± 0,1
6	80°06'	58°10'	33,73	—	< 0,1
7	72°59'	37°34'	35,14	—	1,2 ± 0,2
8	69°02'	33°04'	24,31	—	1,8 ± 0,3

Под полярными льдами (ст. 1–6) температура воды имела отрицательные значения.

Согласно опубликованным данным [3, 5], в 1979 г. в поверхностных водах вблизи Северного полюса содержание радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr составляло 6,7 и 5,3 Бк/м³ соответственно. Близкие значения объёмной активности ^{137}Cs ~5,5 Бк/м³ регистрировали в 1983 г. [4, 5]. Именно поверхностные воды были наиболее загрязнены искусственными радионуклидами, на глубинах >1000 м радиоактивное загрязнение снижалось более чем на порядок. В первой половине 1990-х годов воды Северного Ледовитого океана в районе Северного полюса характеризовались более высоким содержанием ^{137}Cs : 11,0–16,5 Бк/м³ [5, 7].

Исследования арктических морей со второй половины 1990-х годов по настоящее время показали тенденцию снижения искусственной радиоактивности [6, 8], однако сохраняется опасность вторичного загрязнения вод в Полярном бассейне при таянии многолетних льдов, накопивших долгоживущие радионуклиды из осадков. Дрейфующие айсберги и паковые льды могут быть не только вторичным источником загрязнения, но и средством транспортировки и перераспределения поллютантов на акватории морей.

От Северного полюса до 85° с. ш. (между 44–48° в. д.) наблюдали сплошной ледовый покров сплочённостью от 7–8 до 9–10 баллов, его толщина > 2 м.

В 2017 г. объёмная активность антропогенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr в поверхностных водах Центрального Полярного бассейна вблизи географической точки “Северный полюс” составила $2,0 \pm 0,2$; $2,1 \pm 0,3$ Бк/м³ соответственно. Эти значения согласуются с результатами аналогичных измерений, выполненных в смежных арктических морях в последние годы (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения объёмных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr (Бк/м³) в поверхностных водах российских морей Северного Ледовитого океана, 2013–2017 гг.

Исследуемый район	^{137}Cs			^{90}Sr		
	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>n</i>	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>n</i>
Центральный Полярный бассейн (Северный полюс)	2,00		1	2,11		1
Баренцево море	1,71	0,76	206	4,14	3,09	147
Карское море	1,98	0,97	50	5,58	3,68	49
Море Лаптевых	1,19	0,71	83	5,20	5,16	32
Восточно-Сибирское море	0,93	0,55	37	5,12	4,67	8

Примечание. *n* — число измерений.

Статистический анализ уровней радиоактивного загрязнения поверхностных вод четырёх исследованных морей Северного Ледовитого океана, выполненный с использованием непараметрического критерия Краскела—Уоллиса (H) [9, 10], показал наличие статистически значимых различий между акваториями по содержанию ^{137}Cs ($H = 58,035$, $df = 3$; $p < 0,001$) и отсутствие таковых по содержанию ^{90}Sr ($H = 7,327$, $df = 3$; $p = 0,062$), где df — число степеней свободы, p — достигнутый уровень статистической значимости.

Для детализации установленных различий проведены апостериорные сравнения значений объёмных активностей ^{137}Cs в исследованных морях с помощью критерия Манна—Уитни (U). Всего для четырёх морей проведено шесть парных сравнений ($n = 0,5 \cdot N \cdot (N - 1)$, где N — количество сравниваемых морей). Результаты сравнений (табл. 3) показали, что средние объёмные активности ^{137}Cs в Баренцевом, Карском морях не различаются между собой, но значимо выше, чем в море Лаптевых или Восточно-Сибирском. При этом статистически значимые различия в содержании радионуклида в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море не выявлены. Для интерпретации результатов парных сравнений использован критический уровень значимости p^* , равный 0,0085 ($p^* = 1 - 0,95^{1/n}$, где n — количество производимых сравнений).

В последние годы объёмная активность ^{137}Cs в водах Центрального Полярного бассейна, Баренцева, Карского морей находится приблизительно на одном уровне и составляет в среднем 2 Бк/м³. Это обусловлено общностью источников радиоактивного загрязнения, наиболее значимы из которых глобальные атмосферные и перенос радионуклидов атлантическими водными массами от западноевропейских радиохимических предприятий (Селлафилд и др.). В морях Лаптевых, Восточно-Сибирском, которые в меньшей степени подвержены влиянию Атлантики, отмечены минимальные уровни загрязнения ^{137}Cs .

Таблица 3. Результаты статистического анализа различий в содержании ¹³⁷Cs в поверхностных водах российских морей Северного Ледовитого океана (2013–2017 гг.) с использованием критерия Манна–Уитни

Сравниваемые пары	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>
Баренцево море — Карское море	4211,500	-2,000	0,046
Баренцево море — море Лаптевых	5442,000	-4,838	<0,001
Баренцево море — Восточно-Сибирское море	1494,000	-5,892	<0,001
Карское море — море Лаптевых	1070,000	-4,674	<0,001
Карское море — Восточно-Сибирское море	323,500	-5,170	<0,001
Море Лаптевых — Восточно-Сибирское море	1210,500	-1,853	0,064

Распределение ⁹⁰Sr в воде арктических морей характеризуется большим разбросом значений объёмной активности, не позволяющим выявить чёткие закономерности. Уровень ⁹⁰Sr в водах Центрального Полярного бассейна заметно ниже, чем в смежных арктических акваториях. Вероятно, такие значения ⁹⁰Sr в водах самой высокоширотной области Арктики обусловлены отсутствием влияния материко-

вого стока — главного поставщика этого изотопа в морскую среду [8].

На протяжении всей истории морских радиоэкологических исследований в Российской Арктике Баренцево море остаётся одним из наиболее изученных. На его примере можно с достаточной объективностью проанализировать пространственные (табл. 4) и временные закономерности изменения уровней радиоактивного загрязнения (рис. 2).

Баренцево море — система, открытая для поступления вод из соседних акваторий, в составе которых могут быть различные загрязнители, в том числе искусственные радионуклиды. На гидрологический режим в бассейне наибольшее влияние по сравнению с другими арктическими морями оказывают воды атлантического происхождения. В настоящее время это один из главных источников поступления искусственных радионуклидов в экосистему [11]. Также представляет интерес влияние потенциально опасных объектов атомного флота, расположенных на берегах Кольского полуострова (в Кольском и Мотовском заливах, губе Андреева и др.) и архи-

Таблица 4. Распределение ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr (Бк/м³) в водных массах Баренцева моря (слой 0 м) в 2017 г.

Тип водной массы	¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr		
	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>n</i>	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>n</i>
Прибрежная	2,0	0,7	5	2,1	0,7	6
Атлантическая	1,9	0,1	4	0,6	0,7	2
Трансформированная атлантическая	1,9	0,6	8	—	—	—
Баренцевоморская	1,6	0,4	4	0,9	0,9	3
Арктическая	1,6	1,1	14	1,6	1,1	5
Фронтальная зона	2,2	1,4	5	1,4	1,4	1

Примечание. *n* — количество измеренных проб.

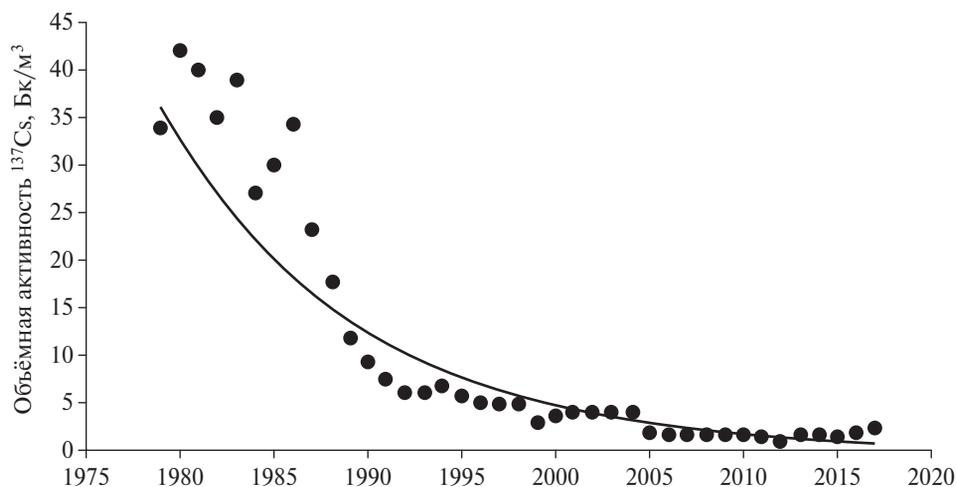


Рис. 2. Многолетняя динамика объёмной активности ¹³⁷Cs в воде Баренцева моря.

пелага Новая Земля (в губе Чёрной). Показателем их влияния может быть повышенный уровень радиоактивности прибрежных вод, формирующихся с участием материкового стока.

В работе использовались схема циркуляции вод и положение климатических фронтальных зон в Баренцевом море [12]. Типизация водных масс (табл. 4) выполнена по классификации, предложенной Л.К. Цехоцкой [13], в основе которой лежит изменчивость гидрологических характеристик (температуры и солёности) на станциях отбора проб.

Статистический анализ распределения объёмной активности искусственных радионуклидов в шести типах водных масс Баренцева моря на основе критерия Краскела—Уоллиса показал отсутствие статистически значимых различий в пространственном распределении ^{137}Cs ($H=5,654$, $df=5$; $p=0,341$) и ^{90}Sr ($H=5,227$, $df=4$; $p=0,265$).

Увеличение ^{137}Cs в воде Баренцева моря (до 45 Бк/м^3) произошло к 1979–1980 гг. С этого времени многолетняя динамика изменения объёмной активности ^{137}Cs в воде Баренцева моря подчиняется законам экспоненциального снижения. Экспоненциальная функция, с высокой степенью достоверности ($R^2=0,91$) описывающая наблюдаемую тенденцию, имеет вид $y=36,069e^{-0,097x}$, где x — количество лет, прошедших после максимума загрязнения. Время, за которое происходит уменьшение концентраций ^{137}Cs в 2 раза, для Баренцева моря ~7 лет, что меньше физического периода полураспада рассматриваемого радионуклида.

Современная радиационная обстановка в Центральном Полярном бассейне и российских морях Северного Ледовитого океана, оценённая по данным 2013–2017 гг., характеризуется как благополучная и отражает общее снижение влияния приоритетных ранее источников. Выявлены статистически значимые различия средней объёмной активности ^{137}Cs в поверхностном слое вод. Отмечена тенденция уменьшения загрязнённости морской среды в направлении с запада на восток. Максимальные концентрации ^{137}Cs характерны для Баренцева моря, в бассейне которого в XX в. разгружались трансграничные поступления западноевропейских радиохимических предприятий, проводили надводные, подводные ядерные взрывы, сбросы и захоронения

ядерных отходов. Повышенный уровень загрязнения ^{137}Cs Карского моря сформировался преимущественно в результате поступления с речным стоком радиоактивных отходов с заводов Сибири. Меньше всего загрязнены воды морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, наиболее удалённых от европейских источников техногенных радионуклидов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ КНЦ РАН по теме “Воздействие климатических факторов, химического и радиационного загрязнения на морские экосистемы Арктики в условиях комплексного природопользования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. // Атом. энергия. 1985. Т. 58. В. 6. С. 445–449.
2. Aarkrog A.J. // Environ. Radioactivity. 1994. № 25. P. 21–35.
3. Livingston H.D., Kupferman S.L., Bowen V.T., Moore R.M. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. P. 2195–2203.
4. Smith J.N., Ellis K.M. // Deep-Sea Res. II. 1995. V. 42. № 6. P. 1449–1470.
5. Crene K., Galasso J.L. Arctic Environmental Atlas. Wash. (DC): Naval Res. Lab., 1999. 164 p.
6. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. 417 с.
7. Arctic Pollution Issues: a State of the Arctic Environment Report. AMAP Arctic. Oslo: Monitoring and Assessment Programme, 1997. 188 p.
8. Тенденции и динамика загрязнения природной среды Российской Федерации на рубеже XX–XXI вв. / Под ред. Ю.А. Израэля. М.: Изд-во Росгидромета, 2007. 65 с.
9. Гржибовский А.М. // Экология человека. 2008. № 3. С. 50–58.
10. Унгурияну Т.Н., Гржибовский А.М. // Экология человека. 2011. № 5. С. 55–60.
11. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Павельская Е.В. // ДАН. 2011. Т. 439. № 6. С. 822–827.
12. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В., Жичкин А.П. // Пробл. Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 7–21.
13. Цехоцкая Л.К. В кн.: Жизнь и условия ее существования в пелагиали Баренцева моря. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1985. С. 42–46.

TECHNOGENIC RADIOACTIVITY OF WATERS IN THE CENTRAL ARCTIC BASIN AND ADJACENT WATER AREA

Academician of the RAS **G. G. Matishov, N. E. Kasatkina, I. S. Usyagina**

Received May 16, 2018

The contemporary radiation situation in the Arctic Basin and Russian Arctic seas is assessed on the basis of data from 2013 to 2017. Statistically significant differences are revealed in the mean volumetric activity of ^{137}Cs in the surface water layer. The tendency toward a west-to-east decrease in seawater pollution is noted. The maximum ^{137}Cs concentrations are characteristic of the Barents and Kara seas. The least polluted waters are reported in the Laptev and East Siberian seas, which are the most remote from the sources of technogenic radionuclides in Europe.

Keywords: water, Arctic Ocean, Arctic seas, pollution, technogenic radionuclides.

УДК 551.46

СЕЗОННАЯ И МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФИТОПЛАНКТОНА В ЧЁРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И КОНТАКТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ХЛОРОФИЛЛА *a*

С. В. Востоков^{1,*}, член-корреспондент РАН Л. И. Лобковский¹,
А. С. Востокова², Д. М. Соловьев³

Поступило 26.07.2018 г.

На основании обработки данных сканера цвета Modis Aqua и многолетних наблюдений в северо-восточной части Чёрного моря изучены закономерности сезонной и многолетней изменчивости фитопланктона, в том числе кокколитофорид. Показано, что фитопланктон в прибрежных и открытых водах Чёрного моря достигает наибольшего развития в осенне-зимний и зимне-весенний сезоны, в периоды развитой зимней конвекции. Для прибрежных вод также характерен выраженный весенний пик концентраций хлорофилла *a*, связанный с цветением вод фитопланктоном в марте. Отмечается связь между уровнем развития кокколитофорид в летний период и минимальной температурой поверхностного слоя предшествующей зимой. Наиболее мощные цветения кокколитофорид, зафиксированные в летний период, наблюдались после самых холодных зим. По спутниковым данным и натурным наблюдениям зафиксированы необычные для Чёрного моря зимние и зимне-весенние цветения вод кокколитофоридами, развивающиеся в условиях тёплых зим с ослабленной ветровой активностью.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, фитопланктон, дистанционное зондирование, многолетняя изменчивость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485199-103>

Фитопланктон — основное продукционное звено морской экосистемы [1]. Пространственно-временная динамика фитопланктона как основного продуцента органического и минерального вещества во многом определяет функционирование и сезонный цикл развития морской экосистемы.

Концентрация хлорофилла *a* характеризует развитие фитопланктона и его продукционные характеристики [2, 3]. Количественные характеристики фитопланктона отличаются значительной пространственно-временной изменчивостью. Несмотря на длительный период исследований, изменчивость фитопланктона в Чёрном море изучена недостаточно. Причинами являются отсутствие регулярных наблюдений и дискретный характер имеющихся данных о сезонной и многолетней динамике фитопланктона, особенно в открытых водах моря. Развитие технологий спутникового зондирования позволяет существенно уточнять черты сезонной и межгодовой изменчивости фитопланктона, выяс-

нять их региональные особенности, выявлять многолетние тренды [3–5].

Для изучения пространственной и временной изменчивости фитопланктона в Чёрном море были использованы материалы спутникового зондирования (Modis Aqua) в период с 2002 по 2017 г. и результаты контактных измерений хлорофилла *a* в северо-восточной части Чёрного моря с 2010 по 2015 г. (рис. 1), выполненных в экспедиционных условиях экстрактным методом с фотометрическим и флуориметрическим окончаниями (ГОСТ 17.1.4.02-90) [7].

Экспедиционные исследования черноморского фитопланктона показали, что за последнее десятилетие в структуре планктонных фитоценозов Чёрного моря происходят серьёзные трансформации. Они проявляются в снижении роли диатомовых водорослей и усилении роли кокколитофорид [8, 9]. Массовое развитие кокколитофорид в Чёрном море, как правило, слабо выражено в поле хлорофилла *a* (рис. 2). Поэтому закономерности развития кокколитофорид в Чёрном море проанализированы по динамике показателя отражения на длине волны 551 нм, а также концентрации взвешенного неорганического углерода (PIC) — параметра, рассчитанного по специальному алгоритму [6] (рис. 3).

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва

² Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

³ Морской гидрофизический институт
Российской Академии наук, Севастополь

*E-mail: vostokov_s@mail.ru

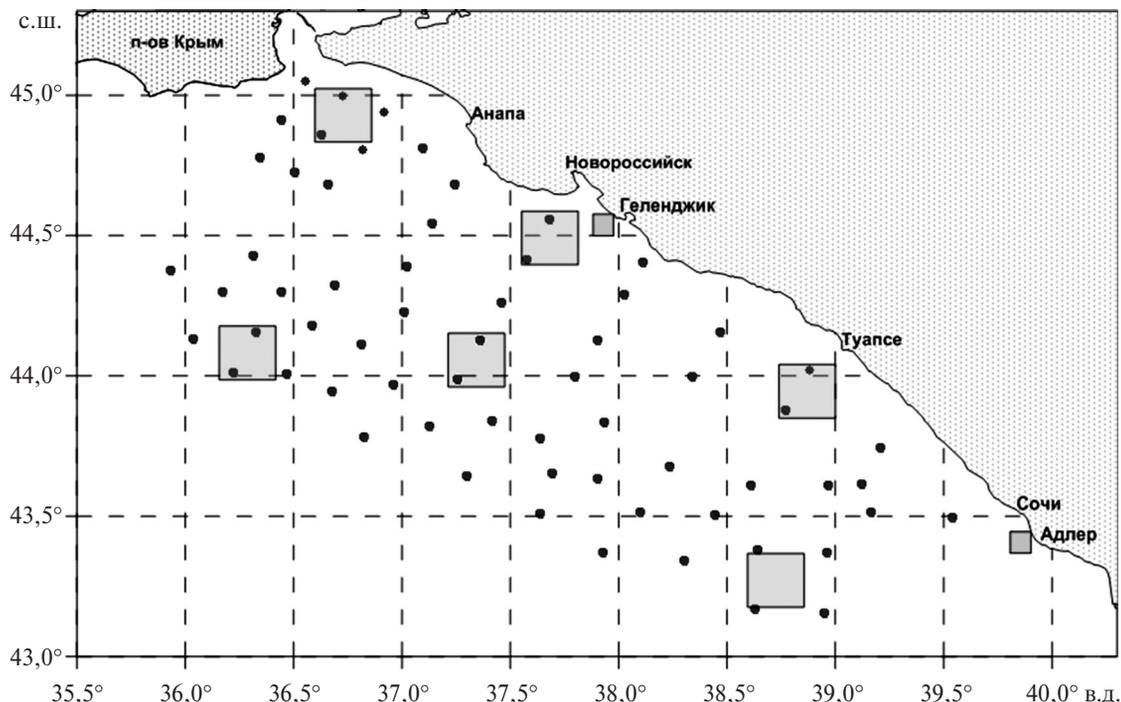


Рис. 1. Расположение точек экспедиционных исследований и спутниковых полигонов в российском секторе Чёрного моря.

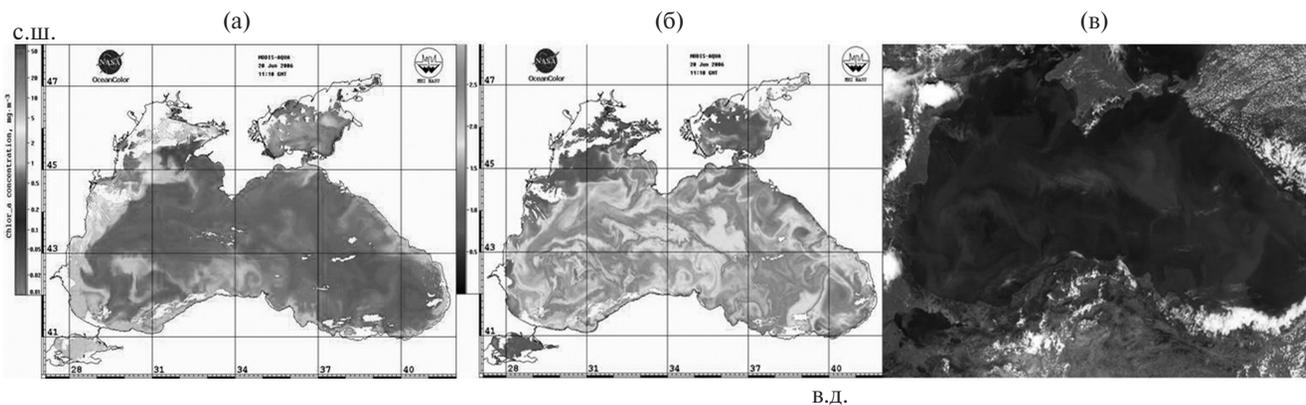


Рис. 2. Распределение параметров, характеризующих развитие фитопланктона в период массового развития кокколитофорид в Чёрном море: а — хлорофилл *a*; б — исходящая радиация на длине волны 551 нм; в — Чёрное море в момент цветения (Modis Aqua 20.06.2006).

Анализ сезонной и межгодовой изменчивости поверхностных концентраций хлорофилла *a* в период с 2002 по 2017 г. в Чёрном море показывает, что наиболее продуктивными сезонами являются осенне-зимний и зимне-весенний периоды. По протяжённости и уровню развития для Чёрного моря большее значение имеют осенне-зимние цветения вод. Исключениями являются 2001 и 2015 гг. В 2001 г. в Чёрном море было отмечено цветение вод фитопланктоном в летний сезон, захватившее большую часть акватории. В августе 2015 г. было зафиксировано очаговое цветение вод в северо-восточной части моря, проявлявшееся в поле хлорофилла *a*

в течение трёх месяцев. Судя по распределению температуры на поверхности моря (данные Modis Aqua), цветение развивалось в районе циклонического вихря, индуцированного локальным ветровым воздействием, усилившим перемешивание вод в поверхностном слое.

По осреднённым спутниковым данным как в прибрежных, так и открытых водах отмечаются осенне-зимний и зимне-весенний периоды активного развития фитопланктона (рис. 3). Существенным отличием сезонной динамики хлорофилла *a* в прибрежной зоне служит выраженный весенний пик концентраций хлорофилла, связанный

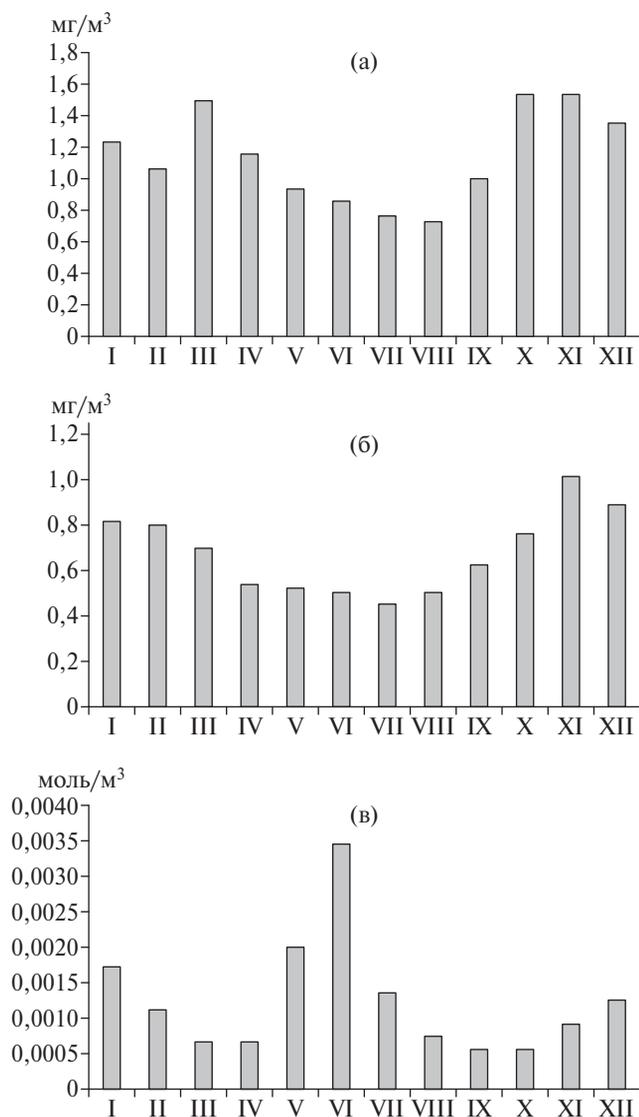


Рис. 3. Изменение средних многолетних концентраций хлорофилла по месяцам в северо-восточной части Чёрного моря: а — в прибрежных водах; б — в открытых водах; в — изменение концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC).

с массовым развитием фитопланктона в марте. Данный результат подтверждается результатами прибрежного мониторинга [8].

Анализ данного материала также свидетельствует, что периоды развития кокколитофорид разной интенсивности наблюдались ежегодно летом с мая по июль. При этом примерно с двухлетней периодичностью в 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2012 гг. происходили цветения вод Чёрного моря кокколитофоридами. Отмечено, что развитие кокколитофорид обычно начинается в начале лета в открытой зоне моря, преимущественно в его восточной и северо-восточной частях, которые являются в этот период своеобразным тёплым сектором

Чёрного моря. В дальнейшем развитие кокколитофорид захватывает остальную акваторию моря и часть прибрежных районов, куда кокколитофориды могут заноситься течениями в рамках вихревой циркуляции. В годы наиболее интенсивного развития кокколитофорид в летний период (2006 и 2012 гг.) цветение захватывало практически всю акваторию Чёрного моря за исключением отдельных областей северо-западного и западного шельфов. Из анализа карт следует, что в прибрежных районах уровень развития кокколитофорид во время цветения по характерным оптическим показателям в целом ниже, чем в открытых водах. Данный вывод подтверждает результаты натурных наблюдений. Кроме того, по спутниковым данным выделяются отдельные годы, отличающиеся нехарактерным цветением вод кокколитофоридами в зимний и весенний периоды (декабрь 2001, 2006, 2010 гг., январь, март 2011 г.). Причиной данных явлений могут служить благоприятные гидрохимические, а также гидрометеорологические условия, характерные для тёплых зим со слабой ветровой активностью, которая не препятствует формированию термоклина. В данном случае наличие термоклина является принципиальным фактором среды, позволяющим водорослям оставаться в зоне светового оптимума, что является необходимым условием для развития кокколитофорид в поверхностном слое. Особенности развития фитопланктона и, в частности, кокколитофорид в Чёрном море обсуждались рядом авторов [8, 9, 11]. Совместный анализ спутниковых данных по межгодовой динамике концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC) и температуры (T) в зимний период указывает на то, что самые мощные цветения кокколитофорид в летний период наблюдались после самых холодных зим (рис. 4).

Температура воды в зимний период в данном случае является показателем интенсивности зимней конвекции и обогащения поверхностных вод биогенными элементами.

Сравнение концентраций хлорофилла a , рассчитанных на основе данных дистанционного зондирования с использованием комбинации алгоритмов по алгоритму OSX (комбинации алгоритмов CHL_OSC4 и CHL_HU), показывает, что спутниковые значения превышают концентрации хлорофилла a в среднем в 1,7–2,3 раза. Завышение незначительно различается для изученных сезонов года, что не препятствует анализу временной изменчивости фитопланктона по данным дистанционного зондирования.

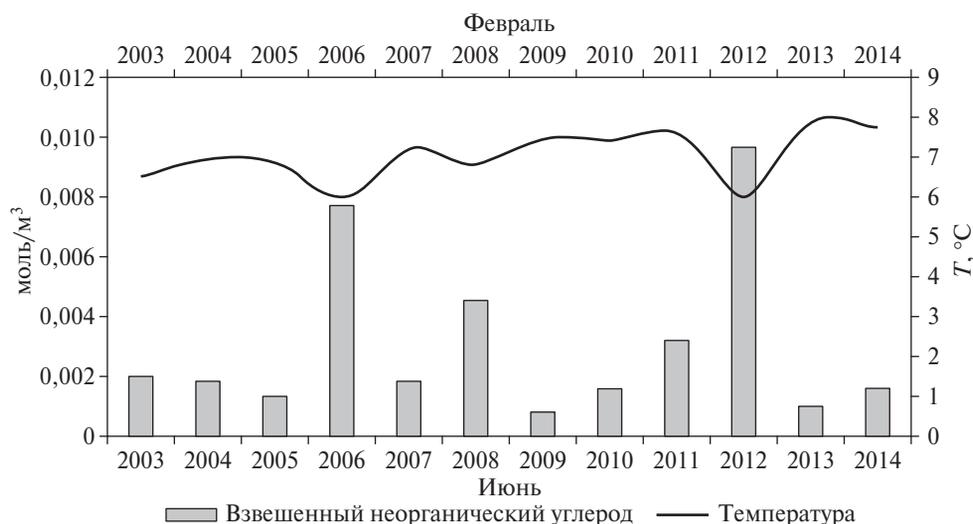


Рис. 4. Концентрации взвешенного неорганического углерода в период максимального развития кокколитофорид в северо-восточной части Чёрного моря и динамика минимальных зимних температур (T) в феврале по данным дистанционного зондирования.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. По спутниковым данным фитопланктон в открытых водах Чёрного моря достигает наибольшего развития в осенне-зимний и зимне-весенний сезоны, т.е. в период развитой зимней конвекции. Это противоречит представлениям о необходимости устойчивой стратификации для развития зимне-весенних цветений в водах умеренного пояса. Факт бурного развития фитопланктона во всём конвективном слое, толщина которого в зимних условиях значительно превышает глубину компенсационной точки фотосинтеза, не согласуется с моделью Свердруп.

2. Для прибрежных вод характерен выраженный пик концентраций хлорофилла a , связанный с бурным развитием фитопланктона в марте (цветением). В открытых водах Чёрного моря весеннего пика развития фитопланктона в марте по осреднённым спутниковым данным не наблюдается.

3. Массовое развитие кокколитофорид в Чёрном море происходит ежегодно в летний период с мая по июль. При этом примерно с двухлетней периодичностью развитие кокколитофорид достигает уровня цветения.

4. Отмечается связь между уровнем развития кокколитофорид в летний период и минимальной температурой поверхностных вод предшествующей зимой. Самые мощные цветения кокколитофорид в летний период наблюдались после самых холодных зим.

5. В последнее десятилетие по спутниковым и экспедиционным данным зафиксированы не-

обычные для Чёрного моря зимние и ранне-весенние цветения вод кокколитофоридами, которые развиваются в условиях тёплых зим при слабой ветровой активности.

Благодарности. Авторы выражают благодарность С.В. Шеберстову за помощь в численной обработке спутниковых данных и Л.А. Паутовой за полезное обсуждение результатов.

Источник финансирования. Работа выполнена по теме госзадания № 0149–2019–0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раймонд Дж. Э. Планктон и продуктивность океана. Т. 1. Фитопланктон. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983.
2. Ведерников В.И. Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в Черном море в весенний и летний периоды // Изменчивость экосистемы Черного моря. Естественные и антропогенные факторы. М.: Наука, 1991. С. 128–147.
3. Востоков С.В., Лисицын Б.Е., Коновалов Б.В. и др. Мезомасштабная изменчивость концентраций хлорофилла a , взвешенного органического вещества и спектрального показателя поглощения света пигментами фитопланктона в поверхностном слое северо-восточной части Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 235–248.
4. Финенко З.З., Суслин В.В., Ковалева И.В. Сезонные и многолетние изменения концентрации хлорофилла в Черном море по спутниковым наблюдениям // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 596–605.
5. OceanColorWebChlorophylla. URL: https://ocean-color.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/

6. ГОСТ 17.1.4.02-90. Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Изд-во стандартов, 2003.
7. Зернова В.В., Незлин Н.П. Сезонные изменения фитоценоза северо-восточной части Черного моря в 1978 г. // Сезонные изменения черноморского планктона. М.: Наука, 1983. С. 12–34.
8. Паутова Л.А., Микаэлян А.С., Силкин В.А. Структура планктонных фитоценозов шельфовых вод северо-восточной части Черного моря в период массового развития *Emiliania huxleyi* в 2002–2005 гг. // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 408–417.
9. Mikaelyan S., Pautova L.A., Chasovnikov V.K., et al. Alternation of Diatoms and Coccolithophores in the North-Eastern Black Sea: a Response to Nutrient Changes // Hydrobiologia. 2015. V. 755. P. 89–105.
10. Silkin V.A., Pautova L.A., Giordano M., Chasovnikov V.K., Vostokov S.V., Podymova O.I., Pakhomov S.V., Moskalenko L.V. Drivers of Phytoplankton Blooms in the North-Eastern Black Sea // Marine Pollution Bull. 2019. V. 138. P. 274–284.

ESTIMATION OF SEASONAL AND INTER-ANNUAL VARIATIONS OF PHYTOPLANKTON IN THE BLACK SEA ON THE BASE OF REMOTE SENSED DATA PROCESSION AND CHLOROPHYLL *a* *in situ* MEASUREMENTS

S. V. Vostokov, Corresponding Member of the RAS L. I. Lobkovskiy,
A. S. Vostokova, D. M. Solov'ev

Received July 26, 2018

The patterns of the seasonal and inter annual variability in the development of phytoplankton, including coccolithophores, were studied in the northeastern part of the Black Sea in various seasons. The research was carried out on the base of remote sensed data provided by the Modis Aqua ocean color scanner and long-term ship observations. The results indicate that, in the coastal and open waters of the Black Sea, the development of phytoplankton reaches the highest level in the fall–winter and winter–spring seasons, i.e., in the periods of active winter convection. It was noted that there is a relationship between the level of coccolithophore development in the summer period and the minimal temperature of the sea surface layer in the preceding winter. The most active coccolithophore blooms, were observed after the coldest winters. Unusual winter and early spring coccolithophore blooms taking place in mild hydro meteorological conditions were registered in the Black Sea, on the base of satellite data and were confirmed by *in situ* measurements.

Keywords: chlorophyll *a*, phytoplankton, remote sensing, seasonal and inter annual changes.

УДК 577.213.3+576.316.352+595.773.4

**АРХИТЕКТУРА ПРОМОТОРОВ ГЕНОВ “ДОМАШНЕГО ХОЗЯЙСТВА”
В МЕЖДИСКАХ ПОЛИТЕННЫХ ХРОМОСОМ
*Drosophila melanogaster***

Т. Ю. Зыкова^{1,*}, В. Г. Левицкий^{2,3}, академик РАН И. Ф. Жимулёв^{1,3}

Поступило 23.11.2018 г.

Впервые изучили молекулярно-генетическую организацию междисков политенных хромосом, локализованных одновременно на молекулярной и цитологической картах генома *Drosophila melanogaster*. Большая часть изученных междисков содержала один ген, имеющий единственный старт транскрипции, остальные междиски — по одному гену с несколькими альтернативными промоторами, два и более однонаправленных гена и гены с расположением “голова-к-голове”. Также обнаружили сложноорганизованные междиски, в которых локализовались три и более гена, имеющие как однонаправленную, так и двунаправленную ориентацию. Инсуляторные белки, ORC, *P*-инсерции, гиперчувствительные к ДНКазе I сайты и другие характеристики открытого хроматина располагались в промоторной области генов, находившихся в междисках. Эта область — критическая для образования междиска, участка открытого хроматина, в котором совмещаются процессы инициации транскрипции и репликации генов.

Ключевые слова: дрозофила, организация генома, политенные хромосомы, междиски, промоторы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524851104-109>

В результате последних крупномасштабных исследований состояний хроматина в объёме всего генома *D. melanogaster* [1] было сформировано представление о локализации генов с повсеместной активностью в междисках политенных хромосом [2]. Гены, которые специфически активны на определённых стадиях и в индивидуальных тканях (гены развития), как оказалось, расположены в плотно упакованных дисках, которые ранее были названы дисками интеркалярного гетерохроматина [3]. Ранее нами было показано, что на уровне полного генома хроматин, соответствующий междискам, имеет сложную структуру в плане генетической организации [2]. В частности, в междисках были найдены одно- и двунаправленные промоторы, гены, целиком расположенные в междисках, и гены с разным числом стартов инициации транскрипции, поэтому встал вопрос о полном исследовании всех междисков, локализованных на молекулярной и цитологической картах генома *D. melanogaster*, на предмет организации типов промоторов в них.

В настоящей работе получены новые данные о топологии или расположении белков и различных характеристик хроматина в пределах последовательностей ДНК междисков. Мы установили, что междиски, содержащие дву- и однонаправленные гены, имеют различную организацию промоторной области, которая, по всей видимости, является критической для образования участка открытого хроматина, который мы описываем как междиск в политенных хромосомах *D. melanogaster*.

На основе данных международного проекта modENCODE и наших исследований [4] была разработана модель четырёх состояний хроматина [2]. Используя сведения о локализации белков, характерных для генетически активного хроматина, мы разработали стереотип его классификации по принципу степени компактизации от минимального (aquamarine, соответствует междискам) до максимального (ruby, соответствует чёрным плотным дискам). Ещё два состояния lazurite и malachite в основном соответствуют кодирующим частям генов [2, 4] и краям блоков генов развития [5].

Согласно расчётам существует пять тысяч междисков в хромосомах *D. melanogaster*, которые содержат примерно 5% ДНК эухроматиновой части генома [6, 7]. Из них только 33 были точно картированы на молекулярной и цитологической картах генома *D. melanogaster*. Поскольку междиски обладают общими свойствами, такими как локализация 5'-UTR генов с повсеместной активностью, обога-

¹ Институт молекулярной и клеточной биологии
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

² Институт цитологии и генетики
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

³ Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет

*E-mail: vatolina@mcb.nsc.ru

шение генами с двунаправленной ориентацией регуляторных областей, локализацией инсуляторных белков (CHRIZ, BEAF-32 и других) и соответствуют хроматину aquamarine [2], анализ их генетической структуры и архитектуры представляет первостепенный интерес.

Ранее мы сравнили организацию и функции генов, полностью локализованных в участке открытого хроматина — междиске, и генов, занимающих две структуры — междиск и серый диск [8].

В настоящей работе мы детально исследовали молекулярно-генетическую организацию последовательностей 33 междисков, локализованных на молекулярной карте *D. melanogaster*. В табл. 1 указано число доменов хроматина *aquamarine*, соответствующих междискам. Два междиска из 33 являются сложными и содержат в пределах своей последовательности несколько участков хроматина *aquamarine*. Для анализа мы использовали версию FlyBase r.5.57 *D. melanogaster*, которая содержит 29761 транскрипт 13753 белоккодирующих генов и междиски с 58 генами и 97 транскриптами с уникальными стартами.

В нашем исследовании мы обнаружили, что междиски имели разную генетическую организацию (табл. 1). Большая часть изученных междисков содержала один ген. В основной части этих междисков локализовались гены, имевшие один старт транскрипции, остальные междиски содержали по одному гену с несколькими альтернативными промоторами (табл. 1, группы I и II). Остальные междисковые последовательности содержали два и более гена. Группа III — это междиски с двумя однонаправленными генами и несколькими транскрипционными стартами. Группа IV — междиски с разнонаправленными генами и группа V — сложноорганизованные междиски, в которых находились три и более гена, имевшие как одно-, так и двунаправленную ориентацию.

Ранее мы показали [9], что точки инициации транскрипции генов расположены в основном в районе центра междисковых последовательностей, а граница хроматина *aquamarine*, соответствующего междискам на молекулярной карте, практически всегда локализована в первом интроне междискового гена.

Для анализа топологии мы выбрали междиски из двух контрастных групп I и IV, содержавшие гены с одним стартом и разнонаправленные гены соответственно (табл. 1). Мы оценили размеры междисков, границы которых были локализованы, при помощи модели четырёх состояний хроматина [2]. Длина междисков, содержавших транскрипты с одним стартом, в среднем составила 3,5 т.п.н., а их

Таблица 1. Локализация генов в междисках

Группа	№	Схема генетической организации междиска	Число генов в междиске	Число стартов инициации транскрипции	Число меж-дисков
I	1		1	1	12
II	2		1	2	4
	3		1	3	2
	4		1	5	1
Всего					19
III	1		2	2	1
	2		2	3	2
Всего					3
IV	1		2	2	1
	2		2	2	2
	3		2	3	2
	4		2	4	2
	5		2	5	1
	6		2	6	1
Всего					9
V	1		3	3	3
	2		3	6	1
	3		4	7	1
Всего					5

размеры менялись от 1 до 15,4 т.п.н. (рис. 1а). Размеры междисков, в которых находились разнонаправленные гены, составили в среднем 3,4 т.п.н. (1,6–7 т.п.н.). Расстояние между промоторами в этих междисках — в среднем 0,7 т.п.н. (рис. 1б). Такие большие размеры четырёх междисков из 33 изученных объясняются тем, что используемая нами модель идентифицирует первый длинный интрон активного гена в хроматине *aquamarine*. Однако все элементы генома и белки, характерные для междисков, рас-

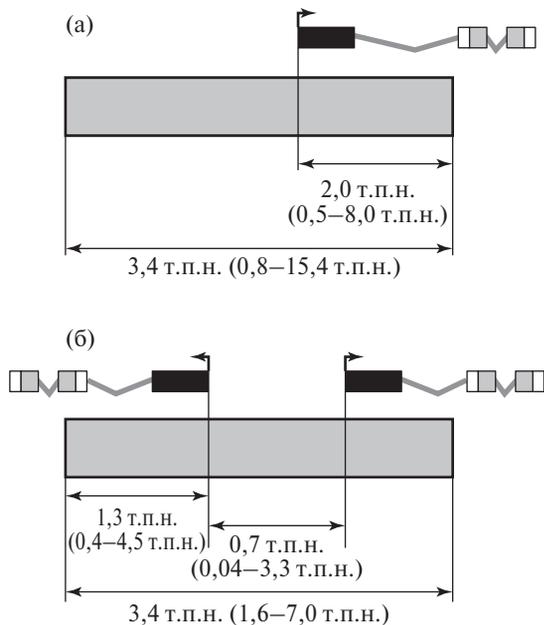


Рис. 1. Расположение генов в междисках. Здесь и на рис. 2 и 3: (а) — междиски, содержащие гены с одним стартом инициации транскрипции (группа I в табл. 1). (б) — междиски, содержащие двунаправленные гены (группа IV).

полагаются в этих доменах в районе промоторной области генов.

Недавно нами было показано [10], что искусственно привлечённые в участок хромосомы белки-инсуляторы CHRI3 и CTCF формируют новый междиск. Мы изучили [11] распределение инсуляторных белков CHRI3 и BEAF-32, а также РНК-полимеразы II в последовательностях междисков, содержащих один ген (группа I) и разнонаправленные гены (группа IV). Последовательности хроматина aquamagine, соответствующие междискам, были выравнены относительно стартов инициации транскрипции генов для междисков I группы и относительно центра между стартами инициации транскрипции для междисков IV группы. Несмотря на то что средний размер междисков составил 3,4 т.п.н. (рис. 1а, б), белки занимали не всю последовательность, а были расположены локально в районе промоторной области генов (рис. 2). Можно видеть, что в последовательностях междисков, содержащих один ген, инсуляторные белки CHRI3 и BEAF-32 локализовались непосредственно на старте инициации транскрипции генов, а РНК-полимераза II была сдвинута в область 200 п.н. выше старта инициации транскрипции (рис. 2а). В междисках, содержащих два разнонаправленных гена, белки BEAF-32 и CHRI3 располагались между стартами инициации транскрипции генов, а РНК-полиме-

раза II имела два пика в районе промоторной области генов (рис. 2б).

В промоторах многих генов присутствует паузировавшая РНК-полимераза II, которая генерирует короткие некодирующие РНК длиной 25–60 п.н. Наличие такой приостановленной формы полимеразы способствует созданию доступной конформации хроматина в регуляторной области гена и связыванию факторов транскрипции [12].

В работе [13] короткие некодирующие РНК, производные паузировавшей формы РНК-полимеразы II, были картированы в геноме дрозофилы и определены их 5'- и 3'-концы, поэтому известны их точные последовательности. Было показано, что такие РНК характерны для доменов открытого aquamagine-хроматина (междисков) дрозофилы [9]. Мы исследовали топологию таких некодирующих РНК, а также белков репликативного комплекса (ORC2) [14], ДНКазу I гиперчувствительных сайтов [1], инсерций *P*-элементов (FlyBase r.5.57) и “широких” промоторов [15] в изучаемых междисках.

Все перечисленные структуры находились в области старта инициации транскрипции генов междисков, содержащих гены с одним стартом транскрипции, и имели два независимых пика в междисках с разнонаправленными генами (рис. 3).

Таким образом, несмотря на то что размер индивидуальных междисков составляет в среднем около 2 т.п.н. [6, 7], а по нашим оценкам — около 3,4 т.п.н., инсуляторные белки и другие ранее описанные структуры, характерные для междисков [2], имели узкую локализацию в районе регуляторной области генов, расположенных в междисках. Обогащение хроматина aquamagine белками ORC и 5'-некодирующими областями генов преимущественно с повсеместной активностью [2, 9] подтвердил тот факт, что междиски совмещают в себе процессы инициации транскрипции и репликации генов. По всей вероятности, регуляторная область генов является определяющей в формировании домена открытого декомпактизированного хроматина междисков.

Источник финансирования. Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 14–14–00934.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kharchenko P.V., Alekseyenko A.A., Schwartz Y.B., et al. Comprehensive Analysis of the Chromatin Landscape in *Drosophila melanogaster* // Nature. 2011. V. 471. № 7339. P. 480–485.
2. Zhimulev I.F., Zykova T.Y., Goncharov F.P., Khoroshko V.A., Demakova O.V., Semeshin V.F., Pokholkova G.V., Boldyreva L.V., Demidova D.S.,

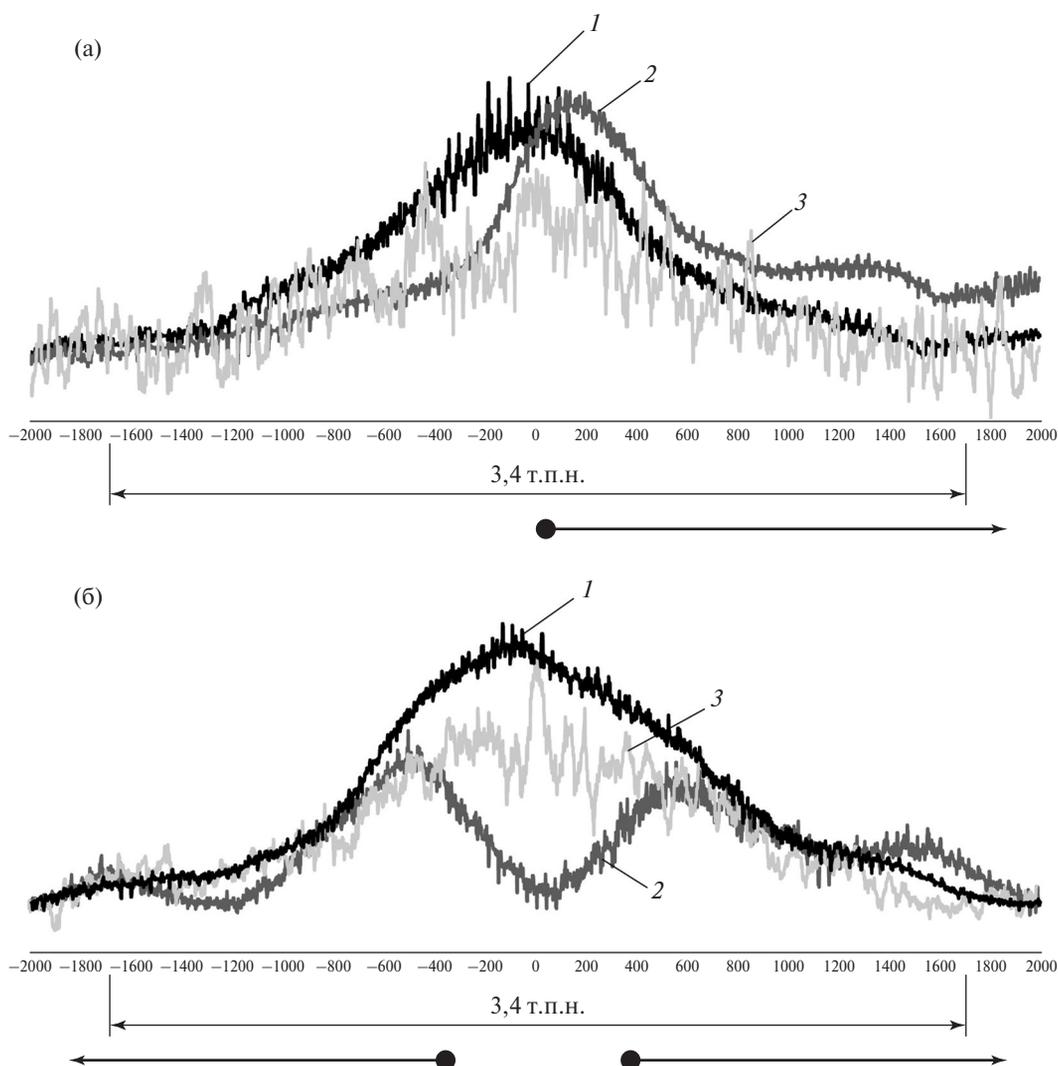


Рис. 2. Локализация белков в последовательностях ДНК, соответствующих междискам политенных хромосом. Здесь и на рис. 3 точка “0” по оси абсцисс соответствует старту инициации транскрипции генов. Цифрами обозначены средняя интенсивность связывания белков в культуре клеток S2 (данные modENCODE): 1 — CHRIZ (CHROMATOR), 2 — РНК-полимераза II, 3 — BEAF-32.

- Babenko V.N., Demakov S.A., Belyaeva E.S.* Genetic Organization of Interphase Chromosome Bands and Interbands in *Drosophila melanogaster* // PLoS One. 2014. V. 9. № 7. e101631.
- Zhimulev I., Belyaeva E., Makunin I., Pirrotta V., Volkova E., Alekseyenko A.* Influence of the *SuUR* Gene on Intercalary Heterochromatin in *Drosophila melanogaster* Polytene Chromosomes // Chromosoma. 2003. V. 111. № 6. P. 377–398.
 - Vatolina T.Yu., Boldyreva L.V., Demakova O.V., Demakov S.A., Kokoza E.B., Semeshin V.F., Babenko V.N., Goncharov F.P., Belyaeva E.S., Zhimulev I.F.* Identical Functional Organization of Cell Line Interphase and Polytene Chromosomes in *Drosophila melanogaster* // PLoS One. 2011. V. 6. № 10. e25960.
 - Khoroshko V.A., Levitsky V.G., Zykova T.Y., Antonenko O.V., Belyaeva E.S., Zhimulev I.F.* Chromatin Heterogeneity and Distribution of Regulatory Elements in the Late-Replicating Intercalary Heterochromatin Domains of *Drosophila melanogaster* Chromosomes // PLoS One. 2016. V. 11. № 6. e0157147.
 - Zhimulev I.F., Belyaeva E.S., Semeshin V.F., Koryakov D.E., Demakov S.A., Demakova O.V., Pokholkova G.V., Andreyeva E.N.* Polytene Chromosomes: 70 Years of Genetic Research // Int. Rev. Cytol. 2004. V. 241. P. 203–275.
 - Beermann W.* Chromomeres and Genes // Results and Problems in Cell Differentiation. 1972. V. 4. P. 1–33.
 - Зыкова Т., Попова О., Хорошко В., Левицкий В., Лавров С., Жимулев И.* Генетическая организация доменов открытого типа, расположенных в междисках политенных хромосом дрозофилы // ДАН. 2018. Т. 483. № 1. С. 98–102.
 - Zykova T., Levitsky V., Belyaeva E., Zhimulev I.* Polytene Chromosomes — A Portrait of Functional Orga-

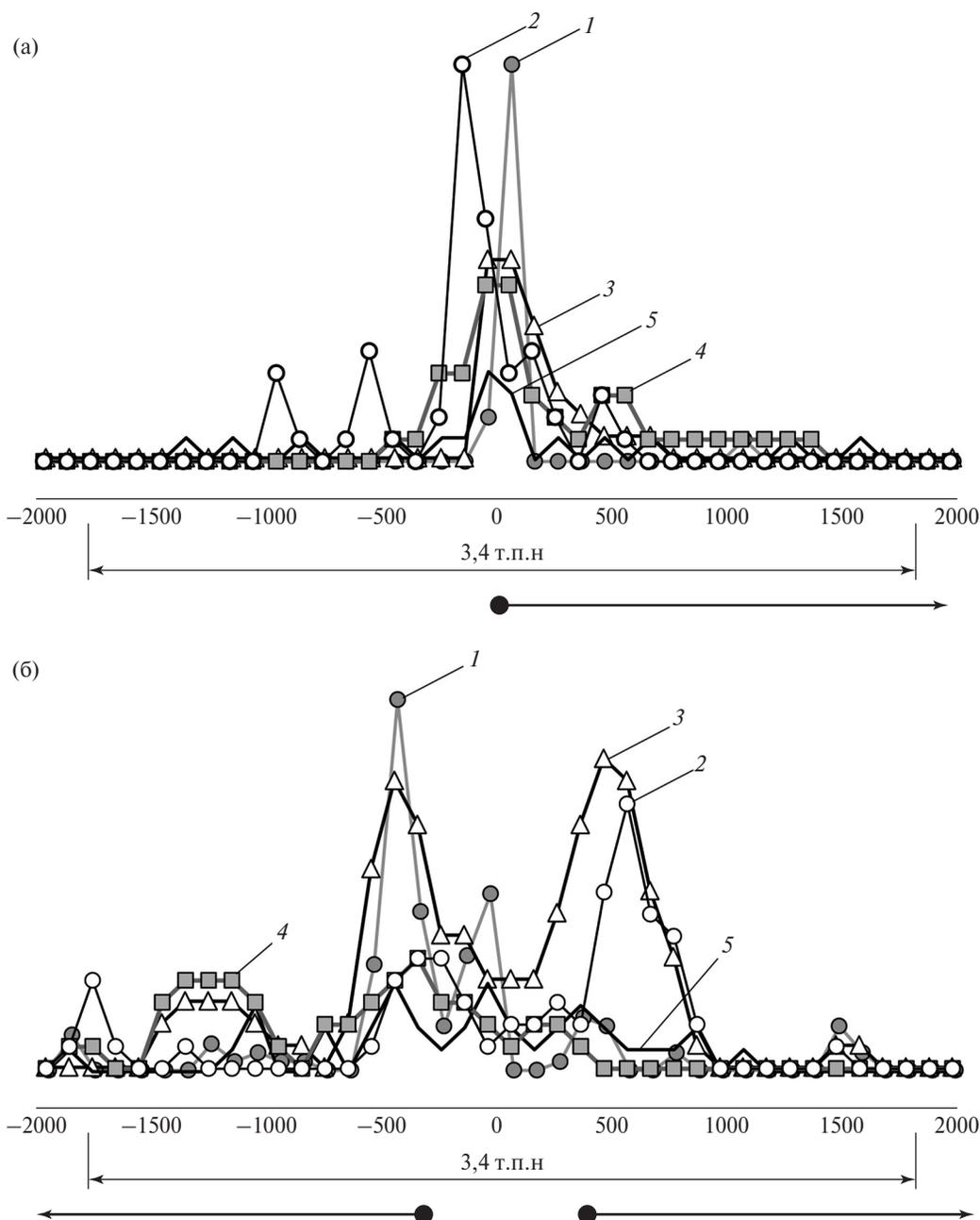


Рис. 3. Локализация элементов генома в последовательностях ДНК, соответствующих междискам полилетних хромосом. Цифрами обозначено среднее число аннотаций характеристик в исследуемых междисках: 1 — короткие РНК, производные паузированной формы РНК-полимеразы II в эмбрионах *D. melanogaster* [13]; 2 — инсерции *P*-элементов (FlyBase г.5.57); 3 — широкие (Broad) промоторы [15]; 4 — белки репликативного комплекса (ORC2) в культуре клеток S2 [14]; 5 — гиперчувствительные к ДНКазе I сайты (DHS) в культуре клеток S2 [1].

- nization of the *Drosophila* Genome // Curr. Genomics. 2018. V. 19. № 3. P. 179–191.
10. Pokholkova G., Demakov S., Andreenkov O., Andreenkova N., Volkova E., Belyaeva E., Zhimulev I. Tethering of CHROMATOR and dCTCF Proteins Results in Decompaction of Condensed Bands in the *Drosophila melanogaster* Polytene Chromosomes but Does Not Affect Their Transcription and Replication Timing // PLoS One. 2018. V. 13. № 4. e0192634.
 11. Vogelmann J., Le Gall A., Dejardin S., Allemand F., Gamot A., Labesse G., Cuvier O., Nègre N., Cohen-Gonsaud M., Margeat E., Nöllmann M. Chromatin Insulator Factors Involved in Long-Range DNA Interactions and Their Role in the Folding of the *Drosophila* Genome // PLoS Genet. 2014. V. 10. № 8. e1004544.
 12. Henriques T., Gilchrist D., Nechaev S., Bern M., Muse G., Burkholder A., Fargo D., Adelman K. Stable

- Pausing by RNA Polymerase II Provides an Opportunity to Target and Integrate Regulatory Signals // *Mol. Cell*. 2013. V. 52. № 4. P. 517–528.
13. *Nechaev S., Fargo D., dos Santos G., Liu L., Gao Y., Adelman K.* Global Analysis of Short RNAs Reveals Widespread Promoter-Proximal Stalling and Arrest of Pol II in *Drosophila* // *Science*. 2010. V. 327. № 5963. P. 335–338.
 14. *Eaton M.L., Prinz J.A., MacAlpine H.K., Tretyakov G., Kharchenko P.V., MacAlpine D.M.* Chromatin Signatures of the *Drosophila* Replication Program // *Genome Res*. 2011. V. 21. № 2. P. 164–174.
 15. *Hoskins R.A., Landolin J.M., Brown J.B., Sandler J.E., Takahashi H., et al.* Genome-Wide Analysis of Promoter Architecture in *Drosophila melanogaster* // *Genome Res*. 2011. V. 21. № 2. P. 182–192.

ARCHITECTURE OF PROMOTERS OF HOUSE-KEEPING GENES IN POLYTENE CHROMOSOME INTERBANDS OF *Drosophila melanogaster*

T. Yu. Zykova, V. G. Levitsky, Academician of the RAS I. F. Zhimulev

Received November 23, 2018

This is the first study to investigate the molecular-genetic organization of polytene chromosome interbands located on both molecular and cytological maps of *Drosophila* genome. The majority of the studied interbands contained one gene with a single transcription initiation site; the remaining interbands contained one gene with several alternative promoters, two or more unidirectional genes, and “head-to-head” arranged genes. In addition, intricately arranged interbands containing three or more genes in both unidirectional and bidirectional orientation were found. Insulator proteins, ORC, *P*-insertions, DNase I hypersensitive sites, and other open chromatin structures were situated in the promoter region of the genes located in the interbands. This area is critical for the formation of the interband, an open chromatin region in which gene transcription and replication are combined.

Keywords: *Drosophila*, organization of genome, polytene chromosomes, interbands, promoters.

УДК 577

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕТЕРОЛОГИЧНОЙ ЭКСПРЕССИИ ЭКТОДОМЕНА РЕЦЕПТОРНОЙ ТИРОЗИНКИНАЗЫ IRR

А. А. Можяев^{1,2,*}, А. Н. Орса¹, И. Е. Деев¹,
академик РАН В. И. Швец³, А. Г. Петренко¹

Поступило 01.12.2018 г.

Разработана методика оптимизации гетерологичной экспрессии эктодомена рецепторной тирозинкиназы IRR, позволившая в дальнейшем упростить выделение этого фермента, очистку и повысить конечный выход. Предложенный нами подход может найти применение в биотехнологическом производстве других рекомбинантных белков большого размера, производимых в медицинских целях.

Ключевые слова: рецептор, подобный рецептору инсулина, гетерологичная экспрессия, рецепторная тирозинкиназа.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524851110-113>

Рецепторные тирозинкиназы — важнейший компонент в системе передачи сигналов в клетке. Они играют ключевую роль в развитии и жизнедеятельности организма, участвуют в регуляции межклеточных взаимодействий, пролиферации и дифференцировке клеток, клеточной миграции и метаболизме, контроле клеточного цикла. Нарушения в работе данных рецепторов способны приводить к возникновению таких социально значимых заболеваний, как рак и диабет.

Рецептор, подобный рецептору инсулина (IRR, Insulin Receptor-related Receptor), относится к мини-семейству рецепторов инсулина. В это мини-семейство помимо IRR также входят рецептор инсулина (IR, Insulin Receptor) и рецептор инсулиноподобного фактора роста (IGF-IR, Insulin-like Growth Factor 1 Receptor). Все три рецептора имеют высокоомологичные аминокислотные последовательности и одинаковые доменные структуры и, предположительно, схожие механизмы функционирования [1]. На сегодня известна пространственная структура внеклеточной части рецептора инсулина, а также кристаллизована часть внеклеточного домена рецептора инсулина вместе с инсулином [1, 2]. Имеются четыре разные модели активации рецепторов данного се-

мейства, и также остаётся не выясненным механизм аутофосфорилирования их внутриклеточных киназных частей.

Физиологическая роль IRR долго оставалась загадкой, так как с момента его открытия для него не было обнаружено ни одного эндогенного лиганда, несмотря на многочисленные попытки, включая полный анализ генома. В нашей лаборатории было впервые показано [3], что IRR является сенсором внеклеточной щелочной среды и принимает активное участие в поддержании кислотно-щелочного равновесия в организме. Мыши с нокаутом гена *IRR* имеют нарушения в поведении [4, 5]. Этот рецептор активируется при защелачивании внеклеточной среды при pH более 7,9, уровень активации, равный 50%, достигается при pH 8,5 и выходит на насыщение при pH более 9,0. Рецептор экспрессируется в отдельных клеточных популяциях почек, желудка и поджелудочной железы, где может контактировать с внеклеточными жидкостями [6]. С использованием химерных конструкций и точечного мутагенеза было установлено, что чувствительность IRR к pH определяется его внеклеточной частью (эктодоменом) [7–9]. Было показано [3, 10], что активация IRR приводит к фосфорилированию сигнальных внутриклеточных белков IRS-1 (Insulin Receptor Substrate 1) и Akt (Protein kinase B) и способствует перестройке цитоскелета клеток. Для изучения его структуры и функции нами были получены и охарактеризованы моноклональные антитела, специфично распознающие внеклеточную часть рецептора IRR [11].

Изучение структуры IRR, понимание особенностей его активации щёлочью и выяснение физиоло-

¹ Институт биоорганической химии им. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова Российской Академии наук, Москва

² Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Федерального научно-исследовательского центра “Кристаллография и фотоника” Российской Академии наук, Москва

³ Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий)

*E-mail: a.a.mozhaev@gmail.com

гической роли в организме представляют большой интерес и могут прояснить механизмы активации гомологичных рецепторных тирозинкиназ семейства рецепторов инсулина. Поскольку активация IRR определяется его внеклеточной частью (эктодоменом), выделение и изучение структуры эктодомена IRR необходимы для понимания фундаментальных основ механизма щелочной чувствительности IRR и для разработки в будущем новых средств лечения заболеваний, обусловленных нарушением кислотно-щелочного равновесия, клеточного деления и дифференцировки, в частности, некоторых форм рака.

Ключевым фактором для определения пространственной структуры чувствительного к pH эктодомена IRR при помощи рентгеноструктурного анализа является возможность получения с высокой степенью очистки рекомбинантного белка в количестве сотен миллиграммов.

Целью настоящей работы была оптимизация условий культивирования клеточной линии CHO-K1, экспрессирующей и секретирующей во внеклеточную среду эктодомен IRR.

Конструирование экспрессионного вектора. Для получения вектора экспрессирующего эктодомен IRR, кДНК, кодирующую эктодомен человеческого IRR, клонировали в вектор pEE6.HCMV-GS ("Celltech Limited", Великобритания). Вектор также содержал промотор цитомегаловируса человека для усиления уровня синтеза мРНК. Продуцируемый белок от N-к С-концу последовательно содержал лидерный пептид MAVPSLWPWGACLPVIFLSLGLDVTV для экспрессии эктодомена во внеклеточной среде (впоследствии отщеплялся), последовательность эктодомена IRR с 1 по 891 а.о., сайт расщепления энтерокиназы NDDDDK и Myc-Tag EQKLISEEDLN. Данный вектор основан на GS Gene Expression System® компании "Lonza" (Швейцария). Итоговый вектор обозначили как pEE6.HCMV-GS-hIRR.

Получение конститутивно экспрессирующей линии продуцента. Для этого клеточную линию CHO-K1 (получена нами ранее [12]) трансфицировали вектором pEE6.HCMV-GS-hIRR с использованием липофектина (Gibco®, "ThermoFisher Scientific", США). При этом происходила интеграция целевого гена в генетический аппарат клетки-хозяина посредством гомологичной рекомбинации. Затем мы проводили селекцию клеточной линии CHO-K1 на среде GMEM с добавлением MSX ("Sigma-Aldrich", США). Через 2–3 нед. после трансфекции проводили отбор клеток по уровню экспрессии эктодомена IRR, который оценивали с помощью иммуноферментного анализа.

Культивирование CHO-K1. Клетки выращивали на чашках Петри в селекционной среде DMEM, содержащей 10% диализованной эмбриональной сыворотки телёнка (dFBS, Gibco®, "ThermoFisher Scientific"), 1% пенициллина/стрептомицина, 1X GS добавка ("Sigma-Aldrich"), 40 мкМ MSX ("Sigma-Aldrich"), плазмоцин 40 мкл/л. Для масштабирования после достижения культурой монослоя через 2–3 дня роста клетки высевали на новые чашки, а затем на матрасы T175 ("Eppendorf", Германия). Инкубацию проводили при 37 °C и 5% CO₂.

Электрофорез в ПААГ и Вестерн-блоттинг. Электрофорез в 8%-м ПААГ в присутствии додецилсульфата натрия с последующим Вестерн-блоттингом проводили по стандартному протоколу, как описано в [13, 14]. Белки переносили на нитроцеллюлозную мембрану в течение 1,5 ч при 250 мА. Неспецифическую сорбцию белков предотвращали инкубацией мембраны в буфере TBST, содержащем 1% БСА, в течение 1 ч. Затем мембрану инкубировали с первичными антителами. Для идентификации выделенного белка использовали поликлональные кроличьи антитела против IRR. Данные антитела были получены против N-концевого фрагмента эктодомена мышинового IRR (539–686 а.о.) [3]. Далее мембрану отмывали от первичных антител и добавляли вторичные мышинные антикроличьи антитела, конъюгированные с пероксидазой хрена. Полосы визуализировали после обработки люминесцентным субстратом SuperSignal™ West Pico PLUS ("ThermoFisher Scientific") с помощью прибора FUSION Solo ("Vilber Lourmat", Германия).

Для получения рекомбинантных рецепторов и их фрагментов применяют разные подходы и системы гетерологической экспрессии. В качестве первоначального подхода мы исследовали возможность получения внеклеточной части IRR в прокариотической системе (*E. coli*), но в дальнейшем выяснилось, что белок IRR в этих условиях не подвергается специфическому протеолизу. Та же ситуация повторилась с экспрессией в дрожжевой культуре *Pichia pastoris* и в клеточной линии насекомого *Spodoptera frugiperda*.

Применение системы экспрессии в клетках млекопитающих перспективно для получения белков эукариотического происхождения, так как позволяет сохранять нативную третичную структуру и посттрансляционные модификации. Особенные свойства нашего объекта исследования определили выбор продуцента — эукариотическая клеточная линия CHO-K1, в которой рецепторы из семейства рецепторов инсулина правильно процессируются при своей

экспрессии. Данная линия происходит из клеток яичника китайского хомячка и является адгезионной.

Первым этапом работ стало конструирование экспрессионного вектора и получение конститутивно экспрессирующей линии продуцента, как было описано выше. Согласно протоколу поставщика ("Lonza") с помощью экспрессионной системы Glutamine Synthetase Xceed Gene Expression мы получили линию клеток CHO-K1, конститутивно экспрессирующую и секретирующую во внеклеточную среду эктодомен IRR с С-концевым Мус-Тэг.

Предварительные эксперименты по выделению белка при росте клеток в среде с 10%-й FBS показали, что при относительно низком уровне экспрессии эктодомена IRR и значительном количестве других белков разработать эффективную систему очистки крайне сложно. Поэтому понадобилось провести оптимизацию состава питательной среды с целью снижения количества сыворотки в питательной среде. Для уменьшения количества других белков в исходном препарате при проведении процедуры очистки после достижения клетками монослоя культуральную среду заменяли на бессывороточные среды α -MEM и RPMI с 1%-м пенициллином/стрептомицином, также варьировалось добавление L-глутамин.

Через 4 дня роста клеток отбирали культуральную среду с целевым белком и анализировали методами электрофореза в ПААГ и Вестерн-блоттинга (рис. 1). При замене среды уровень экспрессии целевого белка сохранился, но при этом значительно сократилось количество посторонних белков сыворотки (преимущественно БСА). При замене бессывороточной среды на новую порцию клетки сохраняли уровень конститутивной экспрессии эктодомена IRR в течение длительного времени при нормальной морфологии.

В результате комплексный подход по разработке системы экспрессии и подбор условий культивирования позволили достичь стабильного выхода (порядка 0,6 мг) эктодомена IRR с литра культуральной жидкости. Добавление L-глутамин в среду культивирования не оказало существенного влияния на уровень экспрессии эктодомена IRR. Данный подход позволил в дальнейшем упростить очистку целевого белка из среды и повысить его конечный выход.

Разработанный нами протокол производства рекомбинантного эктодомена IRR представляет интерес для масштабирования и использования в биотехнологических процессах, поскольку вместо дорогих коммерчески доступных бессывороточных сред, таких как, например, EX-CELL CD CHO Se-

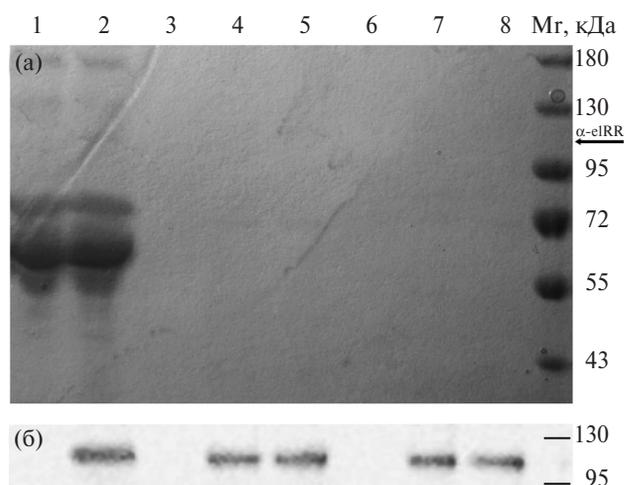


Рис. 1. (а) — электрофореграмма образцов культуральных сред в денатурирующих условиях с добавлением β -меркаптоэтанола. Стрелкой отмечено местоположение α -субъединицы эктодомена IRR (α -eIRR). (б) — Вестерн-блот-окрашивание образцов культуральных сред. Окрашивание антителами против эктодомена IRR, с добавлением β -меркаптоэтанола. Мг, кДа, — маркер молекулярных масс. В качестве образцов культуральных сред использовали: (1) DMEM, 5% dFBS, 1X GS добавка, 40 мкМ MSX, плазмочин 40 мкл/л, (2) DMEM, 5% dFBS, 1X GS добавка, 40 мкМ MSX, плазмочин 40 мкл/л после 4 дней роста CHO-K1, (3) α -MEM, (4) α -MEM после 4 дней роста CHO-K1, (5) α -MEM, 0,6 мг/мл L-глутамин после 4 дней роста CHO-K1, (6) RPMI, (7) RPMI после 4 дней роста CHO-K1, (8) RPMI, 0,6 мг/мл L-глутамин после 4 дней роста CHO-K1.

rum-Free Medium ("Sigma-Aldrich") используются значительно более дешёвые среды (α -MEM и RPMI). При этом выход целевого белка остаётся на достаточно высоком уровне. Предложенный нами подход может найти применение в биотехнологическом производстве других рекомбинантных белков большого размера, производимых в медицинских целях.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 14–50–00131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McKern N.M., Lawrence M.C., Streltsov V.A., Lou M.Z., Adams T.E., Lovrecz G.O., Elleman T.C., Richards K.M., Bentley J.D., Pilling P.A., Hoyne P.A., Cartledge K.A., Pham T.M., Lewis J.L., Sankovich S.E., Stoichevska V., Silva E.D., Robinson C.P., Frenkel M.J., Sparrow L.G., Fernley R.T., Epa V.C., Ward C.W. // Nature. 2006. V. 443. P. 218–221.
2. Menting J.G., Whittaker J., Margetts M.B., Whittaker L.J., Kong G.K., Smith B.J., Watson C.J., Zatkova L., Kletvikova E., Jiracek J., Chan S.J., Steiner D.F., Dodson G.G., Brzozowski A.M.,

- Weiss M.A., Ward C.W., Lawrence M.C. // *Nature*. 2013. V. 493. P. 241–245.
3. Deyev I.E., Sohet F., Vassilenko K.P., Serova O.V., Popova N.V., Zozulya S.A., Burova E.B., Houillier P., Rzhnevsky D.I., Berchatova A.A., Murashev A.N., Chugunov A.O., Efremov R.G., Nikol'sky N.N., Bertelli E., Eladari D., Petrenko A.G. // *Cell Metab*. 2011. V. 13. P. 679–689.
 4. Зубков Е.А., Морозова А.Ю., Чачина Н.А., Шаяхметова Д.М., Можжаев А.А., Деев И.Е., Чехонин В.П., Петренко А.Г. // *ЖВНД*. 2017. Т. 67. № 1. С. 106–112.
 5. Шаяхметова Д.М., Жевленев Е.С., Можжаев А.А., Деев И.Е., Петренко А.Г. // *Биоорган. химия*. 2016. Т. 42. № 4. С. 496–500.
 6. Petrenko A.G., Zozulya S.A., Deyev I.E., Eladari D. // *Biochim. et Biophys. Acta*. 2013. V. 1834. P. 2170–2175.
 7. Deyev I.E., Mitrofanova A.V., Zhevlenev E.S., Radionov N., Berchatova A.A., Popova N.V., Serova O.V., Petrenko A.G. // *J. Biol. Chem*. 2013. V. 288. P. 33884–33893.
 8. Deyev I.E., Chachina N.A., Shayahmetova D.M., Serova O.V., Petrenko A.G. // *Biochimie*. 2015. V. 111. P. 1–9.
 9. Deyev I.E., Popova N.V., Petrenko A.G. // *Acta Naturae*. 2015. V. 7. P. 80–86.
 10. Deyev I.E., Popova N.V., Serova O.V., Zhenilo S.V., Regoli M., Bertelli E., Petrenko A.G. // *Biochimie*. 2017. V. 138. P. 62–69.
 11. Можжаев А.А., Ерохина Т.Н., Серова О.В., Деев И.Е., Петренко А.Г. // *Биоорган. химия*. 2017. Т. 43. № 6. С. 631–636.
 12. Cosgrove L., Lovrecz G.O., Verkuylen A., Cavaleri L., Black L.A., Bentley J.D., Howlett J.G., Gray P.P., Ward C.W., McKern N.M. // *Protein Exp. Purif*. 1995. V. 6. P. 789–798.
 13. Deyev I.E., Petrenko A.G. // *Biochimie*. 2010. V. 92. P. 418–422.
 14. Krasnoperov V., Deyev I.E., Serova O.V., Xu C., Lu Y., Buryanovsky L., Gabibov A.G., Neubert T.A., Petrenko A.G. // *Biochemistry*. 2009. V. 48. P. 3230–3238.

OPTIMIZATION OF HETEROLOGICAL EXPRESSION OF INSULIN RECEPTOR-RELATED RECEPTOR ECTODOMAIN

A. A. Mozhaev, A. N. Orsa, I. E. Deyev, Academician of the RAS V. I. Shvets, A. G. Petrenko

Received December 01, 2018

In this paper, we present an approach to optimize the heterologous expression of the receptor tyrosine kinase IRR, which further simplifies the purification of the IRR from the medium and increases the final yield. The approach proposed by us can find application in the biotechnological production of other large-scale recombinant proteins produced for medical purposes.

Keywords: insulin receptor-related receptor, heterologous expression, receptor tyrosine kinase.

УДК 612.83+612.13

МЕХАНИЗМЫ РЕГУЛЯЦИИ КРОВОТОКА В КОЖЕ ПРИ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА У ЧЕЛОВЕКА

Г. И. Лобов*, член-корреспондент РАН Ю. П. Герасименко, Т. Р. Мошонкина

Поступило 30.11.2018 г.

При чрескожной электростимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) подпороговыми биполярными импульсами частотой 30 Гц у 12 здоровых испытуемых методом лазерной доплеровской флоуметрии зарегистрировали изменения перфузии кожи голени. Установлено, что ЧЭССМ в области позвонков T₁₁ и L₁ приводит к выраженному увеличению кожного кровотока. При интенсивности стимулов 90% от двигательного порога прирост перфузии составил более 85% по сравнению с исходным уровнем. Стимуляция кровотока в коже при ЧЭССМ реализуется преимущественно за счёт антидромной стимуляции сенсорных нервных волокон. Важным посредником, способствующим вазодилатации и увеличению кожного кровотока при ЧЭССМ, является оксид азота, имеющий преимущественно эндотелиальное происхождение.

Ключевые слова: перфузия, чрескожная электростимуляция спинного мозга, кожный кровоток, оксид азота.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524851114-116>

Сравнительно недавно [8–10] был разработан метод чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) человека, важнейшим отличием которого является неинвазивность и, как следствие, отсутствие осложнений, характерных для эпидуральной электрической стимуляции спинного мозга. Ещё одно важное преимущество нового метода — возможность применять его для исследования функций спинного мозга у здорового человека. Дальнейшее развитие методики стимуляции спинного мозга было связано с разработкой мультисегментарной стимуляции. Показано [8, 9], что в процессе мультисегментарной ЧЭССМ происходит конвергенция нисходящих и восходящих влияний на нейронные сети, управляющие постуральными и локомоторными функциями. Предполагается, что при таком воздействии происходит стимулирующее влияние на первичные симпатические нейроны и интернейроны спинного мозга (СМ), участвующие в регуляции вегетативных функций. Ранее проведённое нами исследование эффектов ЧЭССМ на кровоток в коже пальцев стопы показало, что при ЧЭССМ перфузия кожи возрастает за счёт модуляции нервного контроля тонуса кровеносных сосудов [3].

В задачу настоящего исследования входило изучение эффектов и механизмов действия ЧЭССМ стимулами, подпороговыми для вызова двигательного ответа, на кровоток в коже голени, в которой,

в отличие от голой кожи пальцев, функционирует более сложная система регуляции вазомоторных реакций [11].

В исследовании участвовали 12 добровольцев в возрасте 27–42 лет (5 мужчин, 7 женщин). Стимулирующие электроды (катоды) располагали по средней линии спинного мозга между остистыми отростками соседних позвонков на уровнях T₁₁–T₁₂ и L₁–L₂, аноды размещали над гребнями подвздошных костей. Методика проведения ЧЭССМ, применяемое оборудование и регистрация результатов методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) были подробно описаны нами ранее [1]. Первоначально определяли минимальную интенсивность тока, вызывающего двигательные ответы в мышцах ног на одиночные импульсы длительностью 1 мс при стимуляции каждого из уровней, — двигательный порог (ДП). Затем исследовали влияние непрерывной ЧЭССМ на уровнях T₁₁ и L₁. Применяли биполярные импульсы частотой 30 Гц, модулированные частотой 5 кГц, длительность серии 0,5–1 мин. Интенсивность тока градуально увеличивали от минимума до 90% от величины индивидуального ДП. Для оценки параметров и механизмов регуляции кровотока в коже применяли многофункциональный лазерный диагностический комплекс ЛАКК М (НПП “ЛАЗМА”, Россия) [3]. Кончик световодного зонда диагностического комплекса располагали на коже передней поверхности нижней трети голени. Для изучения механизмов вазодилатации, вызываемой ЧЭССМ, применяли крем Эмла® (“AstraZeneca”, Великобритания), содержащий 2,5%

*Институт физиологии им. И.П. Павлова
Российской Академии наук, Санкт-Петербург
E-mail: gilobov@yandex.ru

лидокаина и 2,5% прилокаина. Крем наносили на участок кожи площадью около 4 см². После аппликации проводили непрерывную ЧЭССМ.

Для математической обработки ЛДФ-грамм применяли прилагаемое к комплексу ЛАКК-М стандартное программное обеспечение (версия 3.0.2.376). При статистической обработке полученных результатов использовали пакет прикладных программ STATISTICA, v. 10. Статистическую значимость различий средних оценивали с помощью критерия *t* Стьюдента. Достоверными считали различия при $p \leq 0,05$.

В покое показатель микроциркуляции (ПМ) кожи голени у разных испытуемых колебался в диапазоне 5,2–7,6 пф. ед. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (частота 30 Гц) подпороговыми стимулами с силой тока 90% от ДП в области позвонков T₁₁ и L₁ приводила к выраженному увеличению ПМ в коже голени. При средней величине перфузии кожи голени в покое $6,62 \pm 0,39$ пф. ед. ЧЭССМ с интенсивностью 90% от ДП повышала кровотоки на уровне T₁₁ на 74,3%, а на уровне L₁ — на 88,2% (табл. 1). Мы полагаем, что небольшие различия в реакции сосудов кожи голени при ЧЭССМ в области T₁₁ и L₁ объясняются тем, что в отличие от эпидуральной стимуляции (катод и анод располагаются на дорсальной поверхности мозга и стимулы воздействуют на ограниченные группы нейронов СМ [10]) при ЧЭССМ (катод и аноды на теле испытуемого далеко разнесены друг от друга) возбуждающее действие стимулов проявляется и непосредственно под электродом и, распространяясь по коже, подкожной жировой клетчатке и мышцам, захватывает и соседние корешки спинного мозга [14]. В итоге стимулирующему воздействию подвергается несколько входов в пояснично-крестцовое утолщение, что приводит к охвату возбуждением нейронов нескольких сегментов СМ.

Одновременно с увеличением перфузии в микроциркуляторном русле кожи возрастала и амплитуда колебаний кровотока, что свидетельствует об активации регуляторных механизмов в стенке сосудов [2]. Вейвлет-анализ ЛДФ-грамм, записанных во время ЧЭССМ, показал увеличение амплитуды колебаний кровотока в диапазоне 0,02–0,052 Гц и достоверно снизилась амплитуда колебаний в диапазоне 0,0095–0,02 Гц. Это свидетельствовало об угнетении нейрогенного компонента модуляции кровотока и снижении эффективности эндотелийзависимой регуляции тонуса сосудов в коже голени [2, 5].

Таблица 1. Перфузия кожи голени при ЧЭССМ на уровнях T₁₁ и L₁ на фоне действия крема ЭМЛА, пф. ед.

Локализация электродов	Исходная перфузия	Перфузия при ЧЭССМ	Перфузия при ЧЭССМ на фоне действия ЭМЛА
T ₁₁	$6,62 \pm 0,39$	$11,52 \pm 0,66$	$9,04 \pm 0,47$
L ₁	$6,62 \pm 0,39$	$12,46 \pm 0,73$	$9,25 \pm 0,58$

Примечание. $M \pm SD$, $n = 12$.

туды колебаний микрокровотока в нейрогенном и эндотелийзависимом диапазонах, что свидетельствует о влиянии ЧЭССМ на нервные и опосредуемые эндотелием механизмы модуляции тонуса сосудов кожи [2, 3, 5].

Исследованию механизмов вазодилатации в коже посвящены сотни работ, но до настоящего времени по этому вопросу нет единого мнения [7, 11]. В отличие от гипертермической вазодилатации в коже ЭССМ-индуцированная вазодилатация изучена слабо [12], а механизмы вазодилатации, вызванные ЧЭССМ, практически не исследовались вследствие новизны метода неинвазивной электростимуляции спинного мозга. Мы протестировали ранее высказанную гипотезу о стимулирующем влиянии ЧЭССМ на сенсорные нервные волокна задних корешков СМ и ретроградной передаче возбуждения к сенсорным нервным окончаниям в коже [3]. С этой целью кожу голени в месте исследования предварительно обрабатывали кремом ЭМЛА. Крем содержит лидокаин и прилокаин, обезболивающий эффект которых заключается в блокаде ионных каналов сенсорных нервов. Этот крем широко используется при исследовании механизмов регуляции кровотока в коже [11]. В нашем исследовании применение крема ЭМЛА достоверно снизило прирост перфузии в коже в процессе ЧЭССМ как в зоне T₁₁, так и в зоне L₁ (табл. 1).

Помимо уменьшения перфузии кожи крем ЭМЛА оказывал влияние и на модуляцию кровотока в коже при ЧЭССМ. Вейвлет-анализ показал, что структура колебаний кровотока в микрососудах кожи изменилась: значительно снизилась амплитуда колебаний кровотока в диапазоне 0,02–0,052 Гц и достоверно снизилась амплитуда колебаний в диапазоне 0,0095–0,02 Гц. Это свидетельствовало об угнетении нейрогенного компонента модуляции кровотока и снижении эффективности эндотелийзависимой регуляции тонуса сосудов в коже голени [2, 5].

Результаты нашего исследования позволяют сделать заключение о том, что значительная часть эффекта вазодилатации в коже голени при ЧЭССМ реализуется за счёт антидромной активации афферентных волокон в дорсальных корешках спинного мозга, что приводит к высвобождению в сенсорных нервных окончаниях кожи вазодилаторных субстанций. В ряде работ показано, что в окончаниях сенсорных нервов в коже содержится несколько соединений, обладающих вазодилаторными свойствами [4]. В частности, мощным вазодилатором, находящимся в сенсорных нервных окончаниях, является кальцитонин ген-родственный пептид

(CGRP), способствующий образованию значительных количеств NO в стенке сосуда [15]. Оксид азота считается важным компонентом, участвующим в вазодилатации, индуцированной эпидуральной стимуляцией СМ [6, 12]. Есть основания полагать, что образующийся при ЧЭССМ NO имеет эндотелиальное происхождение. Подтверждением данного положения являются зарегистрированное в процессе ЧЭССМ возрастание амплитуды колебаний микрокровотока в эндотелийзависимом диапазоне, свидетельствующее об увеличении активности эндотелия в микрососудах кожи и её достоверное уменьшение при ЧЭССМ на фоне действия крема ЭМЛА [2].

В заключение считаем необходимым отметить, что ингибирование активности сенсорных нервов в коже голени в нашем исследовании уменьшило величину ЧЭССМ-индуцированной вазодилатации, но не устранило её полностью. Мы предполагаем, что ЧЭССМ стимулирует не только сенсорные нервные волокна, но и структуры СМ, управляющие неадренергическими симпатическими нейронами, иннервирующими кровеносные сосуды кожи [7]. Исследования многих лабораторий демонстрируют важность и сложность этого механизма вазодилатации, функционирующего в волосяной коже человека [3, 7, 15]. Доказательство участия этого механизма в ЧЭССМ-индуцированной вазодилатации в коже — тема наших будущих исследований.

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 16–29–08277 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 1.42.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин А.А., Мошонкина Т.Р., Солопова И.А., Городничев Р.М., Герасименко Ю.П. // Мед. техника. 2016. № 5. С. 8–11.
2. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем. Руководство для врачей. М.: Либроком, 2013. 496 с.
3. Лобов Г.И., Щербакова Н.А., Городничев Р.М., Гришин А.А., Герасименко Ю.П., Мошонкина Т.Р. // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 5. С. 36–42.
4. van Beek M., van Kleef M., Linderth B., et al. // Eur. J. Pain. 2017. V. 21. № 5. P. 795–803.
5. Bernjak A., Cui J., Iwase S., et al. // J. Physiol. 2012. V. 590. № 2. P. 363–375.
6. Carter S.J., Hodges G.J. // Exp. Physiol. 2011. V. 96. № 11. P. 1208–1217.
7. Charkoudian N. // J. Appl. Physiol. 2010. V. 109. № 4. P. 1221–1228.
8. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Moshonkina T., Sayenko D., Gad P. // Ann. Phys. Rehabil. Med. 2015. V. 58. № 4. P. 225–231.
9. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Roy R.R., Lu D.C., Edgerton V.R. // J. Neurophysiol. 2015. V. 113. № 3. P. 834–842.
10. Harkema S., Gerasimenko Y., Hodes J., et al. // Lancet. 2011. V. 377. № 9781. P. 1938–1947.
11. Hodges G.J., Traeger J.A., Tang T., et al. // Amer. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol. 2007. V. 293. № 1. P. 784–789.
12. Naoum J.J., Arbid E.J. // Methodist Debaque Cardiovasc. J. 2013. V. 9. № 2. P. 99–102.
13. Pedrini L., Magnoni F. // Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg. 2007. V. 6. № 4. P. 495–500.
14. Sayenko D.G., Atkinson D.A., Floyd T.C., et al. // Neurosci Lett. 2015. V. 609. P. 229–234.
15. Wu M., Komori N., Qin C., et al. // Brain Res. 2007. V. 1156. P. 80–92.

MECHANISMS OF BLOOD FLOW REGULATION OF IN THE SKIN DURING STIMULATION OF THE SPINAL CORD IN HUMANS

G. I. Lobov, Correspponding Member of the RAS Yu. P. Gerasimenko, T. R. Moshonkina

Received November 30, 2018

Changes of the blood flow in the shin skin in the case of 12 healthy subjects by laser doppler flowmetry were observed under transcutaneous electrical spinal cord stimulation (TSCS) by subthreshold bipolar pulses with a frequency of 30 Hz were detected. It was found that the TSCS in the area of the vertebrae T₁₁ and L₁ leads to a significant increase in skin blood flow. With a stimulus intensity of 90% of the motor threshold, the microcirculation rate increased by more than 85% relative to baseline. The results of the study show that the stimulation of blood flow in the skin by TSCS is realized mainly due to the antidromic stimulation of sensory nerve fibers. An important mediator that contributes to vasodilation and increase of cutaneous blood flow in PSCS is nitric oxide (NO), which is predominantly endothelial in origin.

Keywords: perfusion, transcutaneous electrostimulation of the spinal cord, cutaneous blood flow, nitric oxide.

УДК 573.6+577.17+581.1

СОДЕРЖАНИЕ И БАЛАНС ЭНДОГЕННЫХ БРАССИНОСТЕРОИДОВ
У МИКРОКЛОНОВ КАРТОФЕЛЯ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ
ОРГАНОСПЕЦИФИЧНОСТЬЮ И СКОРОСПЕЛОСТЬЮ СОРТАМ. В. Ефимова^{1,*}, Р. П. Литвиновская², Ю. В. Медведева¹, О. К. Мурган¹,
А. Л. Савчук², член-корреспондент РАН Вл. В. Кузнецов^{1,3}, В. А. Хрипач^{1,2}

Поступило 03.12.2018 г.

Впервые показано, что профили brassinosteroidов (БС) в побегах и корнях растений картофеля являются органоспецифичными и зависят от скороспелости сорта. Установлено, что уровень всех анализируемых групп стероидных фитогормонов в корнях на порядок превышает их содержание в побегах, причём в корнях преобладают brassinosteroidные лактоны, а в побегах — их биогенетические предшественники, 6-кетоны. Скороспелость картофеля сорта Жуковский ранний характеризуется высоким содержанием в побегах практически всех групп БС, в первую очередь представителей группы brassinонида, и относительно высоким содержанием В-лактонов. Показано, что с возрастом у растений снижается содержание В-лактонов и увеличивается содержание В-кетонов.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., in vitro, ранне- и среднеспелые сорта, эндогенное содержание brassinosteroidов, brassинолид, 24-эпibrassinонилид, 28-гомобрassinонилид, лактон, кетон, органоспецифичность.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524851117-121>

Браassinosterоиды (БС), или стероидные фитогормоны, регулируют рост и развитие растений при сравнительно низких концентрациях [1]. Среди основных биологических функций БС можно отметить стимуляцию прорастания семян [2], усиление деления и растяжения клеток [3], регуляцию дифференцировки ксилемы и флоэмы [4], времени цветения, старения и светового развития растений, а также регуляцию экспрессии фотосинтетических генов [5]. Важным биологическим эффектом БС является их способность повышать устойчивость растений к биотическим [6] и абиотическим факторам [7, 8]. Возможно, полифункциональность БС опосредована высокой эффективностью функционирования транскрипционных факторов BZR1/BES1 через прямые и реципрокные взаимодействия с ключевыми регуляторами ответа на экзогенные и эндогенные факторы — DELLAs, PIFs, ARF6, PKL и JUB1 [9]. Перечисленные регуляторы контролируют экспрессию многочисленных генов, вовлечённых в метаболизм белков, мембранный транспорт, биосинтез

клеточной стенки, сигналинг, сборку цитоскелета и функционирование хроматина.

В основе структуры БС лежит 5 α -холестановый скелет, и их структурные различия обусловлены типом и положением функциональных групп в кольцах А/В и алкильных заместителей в боковой цепи. Условно природные БС, содержащие 2 α ,3 α - и 22R,23R-диольные группы, можно классифицировать в зависимости от характера функциональности в цикле В стероидной молекулы. Выделяют 7-окса-6-оксобрassinosterоиды (В-лактоны), 6-оксобрassinosterоиды (В-кетоны) и 6-дезоксобрassinosterоиды, не содержащие функциональности в цикле В (6-дезоксо-БС). В зависимости от типа заместителя при углеродном атоме С-24 боковой цепи различают 24R-метилбрасинстероиды (24R-метил-БС или группа 24-эпibrassinонилида), 24S-метилбрасинстероиды (24S-метил-БС или группа brassинолида) и 28-гомобрassinosterоиды (28-гомо-БС или группа 28-гомобрassinонилида). В настоящее время известно более 70 представителей класса БС, а содержание их в растениях составляет менее 10⁻⁵% [10, 11].

Регуляторное действие экзогенных БС во многом определяется видовой специфичностью растения и содержанием в нём эндогенных стероидных фитогормонов. Для создания эффективной технологии гормональной обработки растений в интересах

¹Национальный исследовательский
Томский государственный университет

²Институт биоорганической химии
Национальной академии наук Беларуси, Минск

³Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: stevmv555@gmail.com

аграрного производства представляются существенными не только знание органной локализации БС и оценка их химической структуры, но и выявление соотношения разных групп БС в ходе онтогенеза сельскохозяйственных культур, среди которых одной из важнейших является картофель. Подобные данные в настоящее время в литературе практически отсутствуют.

В настоящей работе мы впервые установили связь между сроками созревания картофеля и эндогенным содержанием разных групп БС в надземной и подземной частях растений, а также оценили возрастные изменения уровня БС и их соотношение у растений картофеля сорта Red Scarlett.

Работу проводили на растениях *Solanum tuberosum* L., различающихся сроками созревания: раннеспелые (Жуковский ранний и Red Scarlett) и среднеспелые (Луговской и Накра) сорта. Исходные оздоровлённые материнские микроклоны *S. tuberosum* были получены из Всероссийского научно-исследовательского института картофельного хозяйства им. А.Г. Лорха. В дальнейшем провели потоковое клонирование растений-регенерантов дляработки нужного объёма исследуемого материала. Культивирование микрочеренков *in vitro* осуществляли на модифицированной агаризованной безгормональной питательной среде Мурасиге и Скуга (рН 5,8) с добавлением витаминов (тиамин, пиридоксин и никотиновая кислота — 1 мг/л) и сахарозы (30 мг/л). Продолжительность выращивания для сортов Жуковский и Луговской составила 23 сут, Red Scarlett — 23 и 37 сут, для сорта Накра — 30 сут. Эндогенный уровень стероидных гормонов определяли в побегах и корнях микроклонов картофеля, полученных из апикальной части побега (верхушечная почка с прилегающими к ней 2–3 листьями). Микроклоны выращивали под люминесцентными лампами L36W/77 Fluora (“Osram”, Германия) при плотности потока квантов ФАР 200–250 мкмоль · м⁻² · с⁻¹ в фитотроне с 16-часовым фотопериодом и температурой 16 ± 2 °С.

Вирусная, виroidная и бактериальная инфекции широко распространены и вызывают сильное снижение продуктивности растений картофеля. В этой связи нам предстояло исключить вероятное влияние указанных выше биологических инфекций на функционирование генетического аппарата растений и их иммунитет, поскольку наличие инфекций приводит к изменению сортовых характеристик картофеля и в конечном итоге отражается на анализируемых показателях. Тем более ГОСТ 33996-2016 (<http://docs.cntd.ru/document/1200143601>) требует доказать

отсутствие инфекции в растениях картофеля. По этой причине мы провели предварительное тестирование микроклонов на наличие вирусной, виroidной и бактериальной инфекций. Присутствие вирусной нагрузки определяли с помощью ПЦР в реальном времени на ПЦР-амплификаторе Lightcycler'96 (“Roche”, Швейцария). Диагностику на наличие вирусной инфекции (X, Y, M, S, A и вирус скручиваемости листьев картофеля), виroidа веретеновидности клубней картофеля и бактериальной инфекции (бурой и кольцевой гнили картофеля) проводили с использованием коммерческих наборов реагентов ФИТОСКРИН (“Синтол”, Россия). Результаты показали отсутствие инфекции в тестируемых микроклонах картофеля используемых в эксперименте сортов (данные не представлены).

Для определения эндогенного уровня БС образцы картофеля (побеги и корни) фиксировали в жидком азоте и лиофильно высушивали. Лиофилизацию растительных образцов проводили под вакуумом с помощью сублимационной камеры VirTis 6211 (“LabX”, США). Лиофилизированные образцы взвешивали, измельчали, гомогенизировали в 3–5 мл буферного раствора (0,05 М трис, рН 7,4). Буферный экстракт центрифугировали в течение 20 мин на центрифуге BioSan LMC-4200R (“BioSan”, Латвия, 3000 об./мин). Полученный супернатант разводили и количественно анализировали в нём содержание стероидных гормонов группы брассинолида (24S-метил-БС), группы 24-эпibrассинолида (24-эпи-БС), группы 28-гомобрассинолида (28-гомо-БС), В-лактонов (В-лактон-БС) и В-кетоннов (6-кето-БС) методом двухстадийного иммуноферментного анализа [12, 13].

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программы Microsoft Office Excel 2007.

При исследовании микроклонов картофеля оценивали длину побега, объём корневой системы, количество междоузлий и суммарную площадь листовой поверхности микроклонов раннеспелых (Жуковский ранний и Red Scarlett) и среднеспелых (Луговской и Накра) сортов картофеля. Продолжительность культивирования микроклонов в условиях *in vitro* определялась их стадией развития, в частности числом междоузлий. Так, для растений картофеля сортов Жуковский, Red Scarlett и Луговской продолжительность культивирования составила 23 сут, а для сорта Накра — 30 сут, что было связано с его более медленным развитием. Число междоузлий (рис. 1) у растений варьировалось от 7 (сорт Red Scarlett) до 8 (остальные сорта). Максимальную

длину побега мы зарегистрировали у сорта Жуковский ранний, что в 1,5–2 раза превышало аналогичный показатель других сортов. Минимальный объём корневой системы и наименьшая площадь ассимилирующей поверхности были характерны для микроклонов картофеля сорта Red Scarlett. Растения картофеля этого сорта в возрасте 37 сут имели 12 междоузлий и самую большую площадь ассимилирующей поверхности, тогда как объём корневой системы растений сорта Red Scarlett был сопоставим с таковым корней растений других сортов с меньшим сроком культивирования (рис. 1).

Результаты исследования эндогенного содержания БС групп брассинолида (24S-метил-БС), 24-эпibrассинолида (24-эпи-БС), 28-гомобрассинолида (28-гомо-БС), В-лактонов (В-лактон-БС) и 6-кетонов (6-кето-БС) в побегах и корнях ранне- и среднеспелых сортов картофеля, полученные методом иммуноферментного анализа, представлены на рис. 2 и 3. Полученные результаты свидетельствовали прежде всего о том, что уровень всех анализируемых групп стероидных фитогормонов в корнях растений вне зависимости от срока созревания картофеля значительно превышал их содержание в побегах. Обращает на себя внимание тот факт, что в побегах растений отсутствовали (или находились за пределами чувствительности метода) БС группы 24-эпibrассинолида (рис. 2).

Анализируя внешний вид растения (рис. 1) и профиль БС в побегах картофеля (рис. 2), мы обнаружили, что сорт Жуковский ранний наряду с интенсивным развитием характеризовался высоким содержанием практически всех групп БС, особенно представителей группы брассинолида. Весьма ха-



Рис. 1. Внешний вид пробирочных растений *Solanum tuberosum*. Здесь и на рис. 2 и 3 (1) — Red Scarlett (возраст 23 сут), (2) — Red Scarlett (37 сут), (3) — Жуковский ранний (23 сут), (4) — Луговской (23 сут), (5) — Накра (30 сут).

рактерным признаком было также относительно высокое содержание в нём В-лактонов, представляющих заключительный этап биосинтеза гормонов, отличающихся высокой физиологической активностью и, вероятно, определяющих скороспелость сорта. По внешним признакам очень близки к нему были растения раннеспелого сорта картофеля Red Scarlett в возрасте 37 сут. Этот возраст был значительно выше, чем у других растений, а в профиле БС мы наблюдали очевидное преобладание БС-кетонов и рост количества БС ряда 28-гомобрассинолида. Из полученных данных можно сделать вывод, что на начальном этапе онтогенеза раннеспелые сорта характеризуются относительно высоким содержанием БС-лактонов и собственно брассинолида, уровни которых с возрастом снижались, изменяя соотношение в пользу БС-кетонов. Последнее, очевидно, связано со снижением скорости протекания стадии лактонизации в процессе биосинтеза гормонов и с относительным накоплением её исходных продуктов — В-кето-БС. Это особенно хорошо видно на примере сорта Red Scarlett, у которого с возрастом (от 23 до 37 сут) уменьшилось содержание БС-лактонов и увеличилось содержание БС-кетонов (рис. 2, 3).

Морфометрические показатели растений среднеспелых сортов — Луговской и Накра — были достаточно близки. При этом у побегов сорта Накра в профиле БС наблюдалось резкое увеличение содержания кетонов, что, по-видимому, определялось возрастным состоянием растений (рис. 2). Возможно, по этой же причине побеги растений сорта Накра были более развиты (рис. 1).

Профиль БС в корнях изученных растений значительно отличался от аналогичного профиля в побегах (рис. 3). Во-первых, его отличительной чертой было 6–7-кратное преобладание БС-лактонов над БС-кетонами (в меньшей степени это проявлялось лишь у сорта Накра). Во-вторых, у всех сортов мы обнаружили значительное превышение содержания БС группы 24-эпibrассинолида над представителями других групп БС (за исключением БС-лактонов).

У растений сорта Red Scarlett БС-профиль в корнях практически не зависел от возраста растений (от 23 до 37 сут): в возрасте 37 сут содержание 24-эпibrассинолида было ниже, но по-прежнему их уровень превышал содержание представителей других групп БС (рис. 3).

Содержание БС в растениях сорта Накра можно объяснить его особой селекцией. Во-первых, это сорт с высоким содержанием крахмала (18–22%, что на 4–8% выше стандарта), уровень которого, как

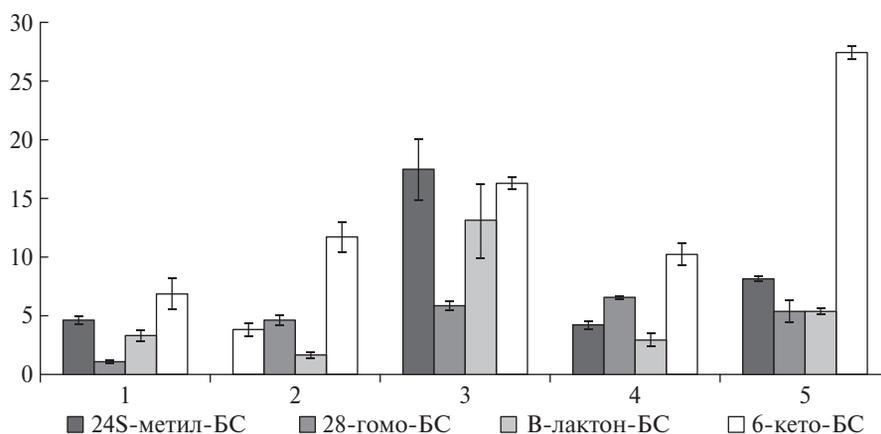


Рис. 2. Содержание эндогенных БС (нг/г лиофилизата) в побегах пробирочных растений картофеля. Здесь и на рис. 3 $M \pm 95\% CI$, $n = 3$.

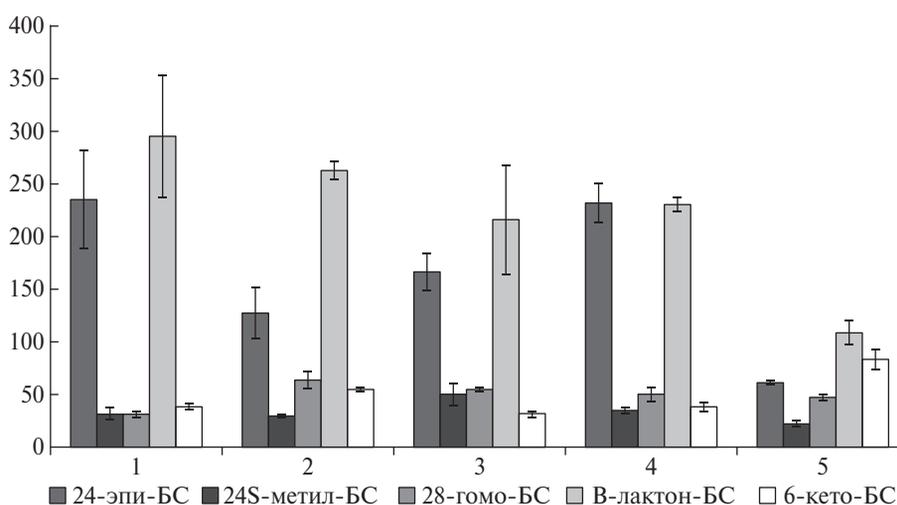


Рис. 3. Содержание эндогенных БС (нг/г лиофилизата) в корнях пробирочных растений картофеля.

известно [14], может регулироваться БС. Во-вторых, сорт Накра наиболее устойчив к некоторым расам фитофтороза, что также может быть связано с его особым БС-профилем [15].

Таким образом, исследование эндогенного уровня БС в корнях и побегах микроклонов картофеля *S. tuberosum* показало, что уровень всех анализируемых групп стероидных фитогормонов в корнях на порядок превышал их содержание в побегах, причём в побегах отсутствовали brassinosteroids группы 24-эпибрасинолида. В корнях преобладали brassinosteroidные В-лактоны, тогда как в побегах всех изученных сортов мы наблюдали значительное увеличение содержания В-кетонив. Скороспелость растений картофеля сорта Жуковский ранний характеризовалась высоким содержанием в побегах практически всех групп БС, в первую очередь представителей группы брасинолида, и относительно высоким содержанием В-лактонов. С увеличением возраста растений (сорт Red Scarlett) мы зарегистри-

ровали уменьшение содержания В-лактонов и увеличение содержания В-кетонив.

Полученные результаты расширяют представления о биологической роли разных групп БС, способствуют раскрытию механизмов их регулирующего и протекторного действия и предоставляют новые возможности для разработки рекомендаций по эффективному применению препаратов стероидных фитогормонов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 16–16–04057.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khripach V.A., Zhbinskii V.N., de Groot A.* Brassinosteroids. A New Class of Plant Hormones. San Diego: Acad. Press, 1999. 456 p.
2. *Ali B.* // *Sci. Horticult.* 2017. V. 225. P. 15–21.
3. *Zhiponova M.K., Vanhoutte I., Boudolf V., Betti C., Dhondt S., Coppens F., Mylle E., Maes S., González-*

- García M.-P., Caño-Delgado A.I., Inzé D., Beemster G.T.S., De Veylder L.* // *New Phytol.* 2013. V. 197. P. 490–502.
4. *Saito M., Kondo Y., Fukuda H.* // *Plant Cell Physiology.* 2018. V. 59. P. 590–600.
5. *Efimova M.V., Vankova R., Kusnetsov V.V., Litvinovskaya R.P., Zlobin I.E., Dobrev P., Vedenicheva N.P., Sauchuk A.L., Karnachuk R.A., Kudryakova N.V., Kuznetsov V.V.* // *Steroids.* 2017. V. 120. P. 32–40.
6. *Song L.-X., Xu X.C., Wang F.-N., Wang Y., Xia X.-J., Shi K., Zhou Y.-H., Zhou J., Yu J.-Q.* // *Plant, Cell and Environ.* 2018. V. 41. P. 1113–1125.
7. *Ефимова М.В., Хрипач В.А., Бойко Е.В., Малофий М.К., Коломейчук Л.В., Мурган О.К., Видершпан А.Н., Мухаматдинова Е.А., Кузнецов В.В.* // *ДАН.* 2018. Т. 478. С. 723–726.
8. *Tanveer M., Shahzad B., Sharma A., Biju S., Bhardwaj R.* // *Plant Physiology and Biochemistry.* 2018. V. 130. P. 69–79.
9. *Li Q., Lu J., Yu J., Zhang Ch., He J., Liu Q.* // *BBA — Gene Regulatory Mechanisms.* 2018. V. 1861. P. 561–571.
10. *Khripach V., Zhabinskii V., De Groot A.* // *Ann. Bot.* 2000. V. 86. P. 441–447.
11. *Bajguz A.* *Brassinosteroids: A Class of Plant Hormone.* B.: Springer Science+Business Media B.V., 2011. P. 1–27.
12. *Pradko A.G., Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L., Drach S.V., Baranovsky A.V., Zhabinskii V.N., Mirantsova T.V., Khripach V.A.* // *Steroids.* 2015. V. 97. P. 78–86.
13. *Law B.* *Immunoassay. A Practical Guide.* Taylor & Francis e-Library. 2005. P. 133–192.
14. *Савельева Е.А., Карась И.И., Вакуленко В.В., Хрипач В.А., Жабинский В.Н., Литвиновская Р.П., Завадская М.И.* Пат. РФ № 3488 М.И. // *Оф. бюл.* 2000. № 3. С. 74.
15. *Савельева Е.А., Карась И.И., Кильчевский А.В., Титова С.Н., Хрипач В.А., Жабинский В.Н., Литвиновская Р.П., Завадская М.И.* Пат. РФ № 3400 // *Оф. бюл.* 2000. № 2. С. 75.

CONTENT AND BALANCE OF ENDOGENOUS BRASSINOSTEROIDS IN POTATO MICROCLONES IS DETERMINED BY THE ORGAN SPECIFICITY AND TERM OF RIPENING VARIETY

**M. V. Efimova, R. P. Litvinovskaya, Yu. V. Medvedeva, O. K. Murgan,
A. L. Sauchuk, Corresponding Member of the RAS V. V. Kuznetsov, V. A. Khripach**

Received December 03, 2018

The endogenous brassinosteroids content in the roots and shoots of early- and mid-season potato microclones was determined. Among the analyzed plant steroid hormones were representatives of brassinolide group, 24-epibrassinolide group, 28-homobrassinolide group, B-lactones and B-ketones. The level of all brassinosteroids in plant roots exceeded significantly that in shoots, irrespective of the potato term of ripening. Of interest is the fact that in plant shoots there were no BS groups of 24-epibrassinolide. We have first found a relationship between the terms of potato ripening and endogenous content of different BS groups in the aerial and underground plant parts; we have also assessed the age-related changes in the content of BSs, as well as their ratio in the potato plants of the Red Scarlett variety.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., in vitro, early and mid season varieties, endogenous brassinosteroid content, brassinolide, 24-epibrassinolide, 28-homobrassinolide, lactone, ketone, organ specificity.

УДК 594.14+591.491

**ИЗМЕНЕНИЕ ПРОПОРЦИЙ ТЕЛА В ПРОЦЕССЕ РОСТА
У ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ВЕСТИМЕНТИФЕРЫ
Oasisia alvinae Jones 1985 (Annelida, Siboglinidae)**

**Н. П. Карасева, Н. Н. Римская-Корсакова, М. М. Ганцевич*,
член-корреспондент РАН В. В. Малахов**

Поступило 26.11.2018 г.

Обнаружено, что в процессе роста гидротермальной вестиментиферы *Oasisia alvinae* происходит относительное увеличение длины туловищного отдела (с 51 до 83,4% от общей длины тела), тогда как относительные размеры всех остальных отделов уменьшаются. Это связано с усиленным развитием трофосомы и гонад в туловищном отделе. Мы полагаем, что преобладающий рост туловищного отдела в онтогенезе — общая закономерность всех вестиментифер.

Ключевые слова: Siboglinidae, Vestimentifera, вестиментиферы, внешняя морфология, рост, пропорции тела.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524851122-125>

Вестиментиферы — крайне своеобразная группа морских беспозвоночных. Они лишены рта и кишечника и живут за счёт симбиоза с внутриклеточными хемоавтотрофными бактериями, населяющими специализированный орган — трофосому [2, 4, 9, 10]. В настоящее время вестиментиферы рассматриваются как специализированные многощетинковые черви, образующие отдельное подсемейство Vestimentifera в составе семейства Siboglinidae [1, 7]. К настоящему времени описан 21 вид вестиментифер, обитающих в гидротермальных оазисах, а также в районах холодных углеводородных просачиваний [1].

Хотя по современным представлениям вестиментиферы относятся к типу Annelida, расчленение тела этих животных резко отличается от такового типичных кольчатых червей. Тело вестиментифер подразделяется на обтюракулярный отдел, несущий парные лопасти — обтюракулы, окружённые многочисленными щупальцами, затем следует вестиментальный отдел, снабжённый кожными складками — вестиментальными крыльями, затем — длинный туловищный отдел, и только на самом заднем конце располагается опистосома. Только опистосома состоит из типичных сегментов, несущих поперечные ряды крючковидных щетинок [2, 8]. Относительная длина отделов тела сильно различается у разных вестиментифер и служит важным систематическим

признаком в этой группе животных [1, 2, 8]. К сожалению, только для самой крупной вестиментиферы *Riftia pachyptila* было проведено исследование, показавшее, что в процессе постэмбрионального онтогенеза относительная длина обтюракулярного отдела существенно меняется [3].

В нашем распоряжении оказались особи вестиментиферы *Oasisia alvinae* Jones 1985, добытые в 2003 г. в 49-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” с использованием глубоководных обитаемых аппаратов “Мир-1” и “Мир-2” в гидротермальных оазисах Восточно-Тихоокеанского поднятия (табл. 1). Исследовали материал 10 особей разного размера, зафиксированный в жидкости Буэна. Несмотря на небольшой объём материала, он оказался уникальным в том отношении, что в нём был представлен полный размерный ряд: от крошечной особи размером 3,5 мм до крупного червя размером более 10 см. В связи

Таблица 1. Географические координаты и глубина сбора материала

Номер экземпляров	Географические координаты места сбора	Глубина места сбора, м
1, 2, 4	09°50,80' с.ш., 104°17,56' в.д.	2519
3, 5, 7	09°50,53' с.ш., 104°17,51' в.д.	2520
6, 9	20°50,00' с.ш., 109°05,00' в.д.	2610
8, 10	09°50,53' с.ш., 104°17,52' в.д.	2524

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

*E-mail: mgantsevitch@gmail.com

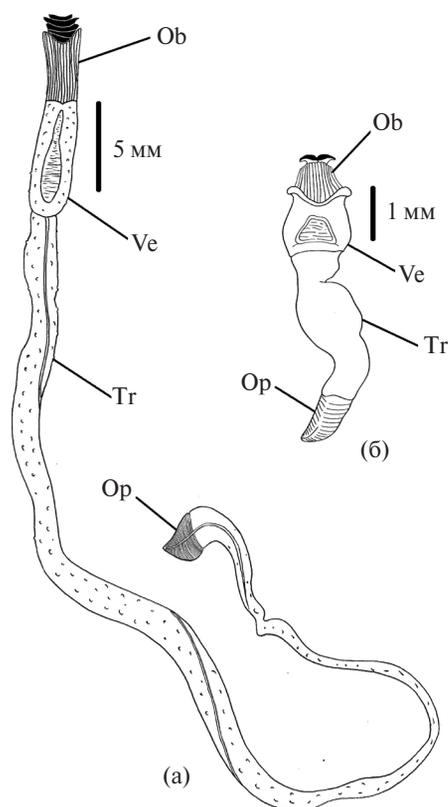


Рис. 1. Внешняя морфология *O. alvinae*. (а) — экземпляр с длиной тела 101 мм, (б) — экземпляр с длиной тела 5,5 мм.

с этим мы воспользовались возможностью проследить изменение пропорций тела, которое могло оказаться типичным не только для *O. alvinae*, но и для вестиментифер вообще.

Как оказалось, расчленение тела на отделы у мелких и крупных особей *O. alvinae* не отличалось от такового взрослых (рис. 1). Однако пропорции тела существенно менялись с увеличением общей длины

тела (табл. 2). К сожалению, небольшой объём выборки не позволил нам применить статистические методы. Тем не менее, исходя из рис. 2, можно сделать вывод, что по мере увеличения размеров тела относительная длина туловищного отдела увеличивается. Существенное увеличение туловищного отдела по мере роста можно связать, с одной стороны, с развитием трофосомы — органа симбиотрофного питания, необходимого для поддержания жизнедеятельности организма, с другой стороны — с развитием половой системы, которая также локализуется в туловищном отделе.

По мере роста у *O. alvinae* происходит относительное уменьшение размеров вестиментального отдела. Как было показано нами ранее [2], вестиментальные крылья несут многоклеточные грушевидные железы, выделяющие материал трубки, и, возможно, что уменьшение относительных размеров вестиментального отдела связано с замедлением роста трубки у взрослых червей. Щетинконосная опистосома выполняет функцию закоривания червя в трубке. В нашем материале опистосома целиком сохранилась у 6 экземпляров с общей длиной тела от 5,5 до 101 мм. С увеличением общей длины тела относительный размер опистосомы уменьшается (рис. 2). Возможно, это объясняется более важным значением закоривающей функции щетинконосной опистосомы для мелких червей, обитающих в короткой трубке.

Что касается обтюракулярного отдела, то у крупных экземпляров его относительные размеры уменьшаются по сравнению с таковыми у мелких особей (рис. 2). Сходная закономерность была отмечена у другой гидротермальной вестиментиферы — *Riftia pachyptila* [3]. У мелких экземпляров *R. pachyptila*

Таблица 2. Размерные характеристики экземпляров *Oasisia alvinae*

№	Общая длина тела, мм	Ob		Ve		Tr		Os	
		Длина, мм	%	Длина, мм	%	Длина, мм	%	Длина, мм	%
1	3,5+	0,5	(14,3)	1	(28,6)	2+	(57,1)	—	—
2	5,2+	0,7	(13,5)	1,5	(28,9)	3+	(57,6)	—	—
3	5,3	0,4	7,5	1,35	25,5	2,7	51	0,85	16
4	8,4+	1,15	(13,7)	2,25	(26,8)	5+	(59,5)	—	—
5	24,8+	3	(12,1)	4,5	(18,1)	15	(60,5)	2,3+	(9,3)
6	27,7	2,5	9	3,5	12,6	19,7	71,2	2	7,2
7	32,2	2,4	7,4	3,9	12,1	24,2	75,2	1,7	5,3
8	41,1	3	7,3	4,7	11,4	31,5	76,6	1,9	4,6
9	41,6	2,7	6,5	4,3	10,3	31,3	75,2	3,3	7,9
10	101	6,2	6,1	7,5	7,4	84,2	83,4	3,1	3,1

Примечание. Здесь и на рис. 1 и 2: Ob — обтюракулярный отдел, Ve — вестиментальный отдел, Tr — туловищный отдел, Os — опистосома. Знак “+” означает, что у экземпляра отсутствует задняя часть туловищного отдела или задняя часть опистосомы, знак “—” означает отсутствие данных. В скобках приведена длина отделов тела в процентах у неполных экземпляров.

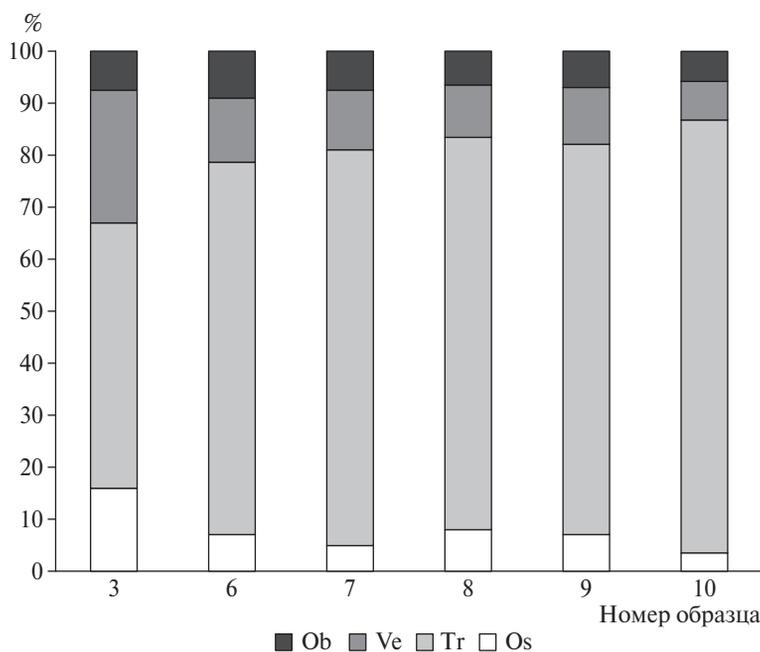


Рис. 2. Изменение пропорций тела в процессе роста у *O. alvinae* (представлены только целые экземпляры). По оси ординат — отношение длины соответствующего отдела к общей длине тела.

длина обтюракулярного отдела составляет в среднем 38% от общей длины тела, тогда как у крупных особей — 27%. В отношении роста туловищного отдела у *R. pachyptila* имеет место та же закономерность, что у *O. alvinae*. У мелких особей *R. pachyptila* относительная длина туловищного отдела составляет 47% от общей длины тела, а у крупных — 57% [3].

У вестиментифер, принадлежащих к инфрасемейству *Tevniinae*, которые обитают в гидротермальных очагах, отношение длины обтюракулярного и вестиментального отделов составляет от 1 : 1 до 3 : 1, тогда как у вестиментифер, обитающих в холодных углеводородных просачиваниях (инфрасемейства *Lamellibrachiinae* и *Escarpiinae*), обтюракулярный отдел меньше вестиментального в 2–5 раз [1, 2, 8]. У гидротермальных вестиментифер, прикрепляющихся задним концом трубки к твёрдому субстрату, поглощение сульфида, кислорода и углекислоты осуществляется только через щупальца. В холодной воде глубоководных углеводородных просачиваний растворимость газов выше, чем в горячей воде гидротермальных оазисов, что позволяет вестиментиферам инфрасемейств *Lamellibrachiinae* и *Escarpiinae* иметь меньшее число щупальцевых ламелл и укороченный обтюракулярный отдел, который не участвует в поглощении сульфида. Сульфид диффундирует из толщи осадка через рыхлые стенки задней части трубки, погружённой в толщу осадка, и поглощается через покровы туловищного отдела [5, 6, 9]. У вестиментифер углеводородных просачиваний протяжённость туловищного отдела

может составлять 97% от общей длины тела, как это отмечено для *Lamellibrachia barhami* [12].

Таким образом, отношение отделов тела не только играет важную роль в таксономии вестиментифер, но и отражает характерные особенности их экологии и заслуживает специального внимания исследователей.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность С.В. Галкину за предоставление материала.

Источник финансирования. Исследование поддержано грантом Российского научного фонда 18–14–00141.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасева Н.П., Римская-Корсакова Н.Н., Галкин С.В., Малахов В.В. Таксономия, географическое и батиметрическое распространение вестиментифер (Annelida, Siboglinidae) // Зоол. журн. 2016. Т. 95. № 6. С. 624–659.
2. Малахов В.В., Галкин С.В. Вестиментиферы — бескишечные беспозвоночные морских глубин. М.: КМК Sci. Press, 1998. 205 с.
3. Andersen A.C., Jolivet S., Claudinot S., Lallier F.H. Biometry of the Branchial Plume in the Hydrothermal Vent Tubeworm *Riftia pachyptila* (Vestimentifera; Annelida) // Canad. J. Zool. 2002. V. 80. P. 320–332.
4. Cavanaugh C.M., McKiness Z.P., Newton I.L.G., Stewart F.J. Marine Chemosynthetic Symbioses. In: The Prokaryotes. Prokaryotic Biology and Symbiotic

- Associations. 4th ed. Heidelberg; N.Y.: Dordrecht; L.: Springer, 2013. P. 579–607.
5. Dattagupta S., Miles L.L., Barnabei M.S., Fisher Ch.R. The Hydrocarbon Seep Tubeworm *Lamellibrachia luymesii* Primarily Eliminates Sulfate and Hydrogen Ions across Its Roots to Conserve Energy and Ensure Sulfide Supply // J. Exp. Biol. 2006. V. 209. P. 3795–3805.
 6. Freytag J.K., Girguis P.R., Bergquist D.C., Andras J.P., Childress J.J., Fisher Ch.R. A Paradox Resolved: Sulfide Acquisition by Roots of Seep Tubeworms Sustains Net Chemoautotrophy // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2001. V. 98. № 23. P. 13408–13413.
 7. Hilario A., Capa M., Dahlgren T.G., Halanych K.M., Little C.T.S., Thornhill D.J., Verna C., Glover A.G. New Perspectives on the Ecology and Evolution of Siboglinid Tubeworms // PLoS One. 2011. V. 6. Iss. 2. P. 1–13.
 8. Jones M.L. On the Vestimentifera, New Phylum: Six New Species and Other Taxa, from Hydrothermal Vents and Elsewhere // Bull. Biol. Soc. Wash. 1985. V. 6. P. 117–158.
 9. Julian D., Gaill F., Wood E., Arp A.J., Fisher C.R. Roots as a Site Of hydrogen Sulphide Uptake in the Hydrocarbon Seep Vestimentiferan *Lamellibrachia* sp. // J. Exp. Biol. 1999. V. 202. P. 2245–2257.
 10. Stewart F.J., Cavanaugh C.M. Symbiosis of Thioautotrophic Bacteria with *Riftia pachyptila*. In: Progress in Molecular and Subcellular Biology. Molecular Basis of Symbiosis. B.; Heidelberg; Springer-Verlag, 2005. P. 197–225.
 11. Thornhill D.J., Fielman K.T., Santos S.R., Halanych K.M. Siboglinid-Bacteria Endosymbiosis. A Model System for Studying Symbiotic Mechanisms // Commun. & Integrat. Biol. 2008. V. 1. № 2. P. 163–166.
 12. Webb M. *Lamellibrachia barhami*, gen. nov., sp. nov. (Pogonophora), from the Northeast Pacific // Bull. Mar. Sci. 1969. V. 19. P. 18–47.

**CHANGING OF BODY PROPORTION DURING GROWTH
IN HYDROTHERMAL VESTIMENTIFERAN *Oasisia alvinae* Jones 1985
(Annelida, Siboglinidae)**

**N. P. Karaseva, N. N. Rimskaya-Korsakova, M. M. Gantsevich,
Corresponding Member of the RAS V. V. Malakhov**

Received November 26, 2018

During the growth of hydrothermal vestimentiferan *Oasisia alvinae* the trunk part of body was found to be elongated (from 51 to 83.4% of the overall body length), while the relative dimensions of all other body regions decreased. This was related to the enhanced trophosome and gonad development in the trunk part. We suppose that predominant trunk growth is a common feature of all vestimentiferans.

Keywords: Siboglinidae, Vestimentifera, vestimentiferans, external morphology, growth, body proportions.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА

- «Доклады Академии наук» — один из крупнейших в мире научных журналов, орган Президиума РАН. Основное назначение журнала заключается прежде всего в публикации сообщений о крупных научных исследованиях, имеющих приоритетный характер.
- «Доклады Академии наук» (ДАН) публикуют краткие сообщения об оригинальных и нигде не опубликованных исследованиях в области математики, естественных и технических наук, авторами которых являются действительные члены Российской академии наук (академики), члены-корреспонденты и иностранные члены Российской академии наук. Сообщения других авторов должны иметь представление от действительного или иностранного члена РАН по соответствующей специальности, полученное до направления статьи в редакцию.
- Публикация в ДАН не препятствует впоследствии публикации расширенного варианта в другом периодическом издании.
- Журнал переводится на английский язык под названиями:
 - Doklady Biochemistry and Biophysics,
 - Doklady Biological Sciences,
 - Doklady Chemistry,
 - Doklady Mathematics,
 - Doklady Physical Chemistry,
 - Doklady Physics,
 - Doklady Earth Sciences.
- Назначение «Докладов Академии наук» заключается прежде всего в публикации сообщений о крупных научных исследованиях, имеющих приоритетный характер. Предлагаемое сообщение после изложения постановки задачи должно содержать краткую формулировку, суммирующую основной результат статьи, который, по мнению авторов, удовлетворяет указанному условию и определяет целесообразность публикации именно в ДАН.
- В журнале не публикуются: полемические, классификационные и узкоспециальные статьи, содержащие решения стандартных задач; статьи описательные, обзорные и методические (если метод не является принципиально новым); статьи, излагающие обобщения и предположения, непосредственно не вытекающие из публикуемого оригинального фактического материала; статьи серийные и излагающие отдельные этапы исследований, содержащие материал, явным образом разделённый на несколько последовательных публикаций; статьи о рядовых исследованиях, не представляющие общего интереса.
- Статьи, поступившие в редакцию, проходят экспертизу членов редколлегии и при необходимости направляются на внешнее рецензирование. Решением редколлегии рукопись может быть отклонена, если она не удовлетворяет перечисленным выше требованиям.
- Одобрённые редакционной коллегией статьи публикуются по мере поступления. Единственным поводом для внеочередной публикации по решению редколлегии является исключительная важность сообщения или соображения приоритета (журнал выходит каждые 10 дней, т.е. 3 раза в месяц, или 36 раз в год).
- Возвращение рукописи автору на доработку не означает, что она принята к печати. После получения доработанного текста рукопись вновь рассматривается редколлегией. Доработанный текст автор должен вернуть вместе с исходным вариантом, а также с ответом на все замечания. Датой поступления после доработки считается день получения редакцией окончательного варианта.
- Не принятые к публикации работы авторам не высылаются.
- Статьи, отклонённые редколлегией, повторно не рассматриваются.

ОБЩИЕ ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Доклады Академии наук» просит авторов руководствоваться приводимыми ниже правилами и надеется, что авторы ознакомятся с ними, прежде чем пришлют рукопись на рассмотрение в редакцию. Рукописи, оформленные и

переданные в редакцию без соблюдения этих правил, могут быть отклонены без детального рассмотрения и рецензирования.

- Все рукописи статей принимаются редакцией в электронном виде: а) через сайт журнала (<https://journals.eco-vector.com/0869-5652>) или б) по электронной почте (dan@eco-vector.com). Для ускорения публикации предпочтителен первый способ. Перед отправкой рукописи через указанный сайт авторам (представителю авторского коллектива) необходимо зарегистрироваться на сайте.
- Авторы должны выбрать раздел журнала, в который следует поместить статью (см. [перечень разделов журнала на сайте](#)).
- Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и одобрен всеми авторами перед её подачей в редакцию.
- Редакция обращает внимание авторов на то, что «Доклады Академии наук» являются органом общей научной информации и в связи с этим просит авторов излагать материал в ясной и доступной форме.
- Если материал не может быть изложен в краткой форме, редакция советует авторам направлять его в какой-либо специализированный журнал. Работы, нарушающие эти условия, редакция возвращает авторам для сокращения, не рассматривая их.
- В математических работах желательно избегать доказательств теорем, лемм и т.п.
- При описании методики исследования следует ограничиваться её оригинальной частью, при элементном анализе — приводить только усреднённые данные.
- Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания.
- Видовые и родовые названия растений и животных должны быть приведены полностью при первом упоминании, согласно правилам биологической номенклатуры.
- При упоминании иностранных фамилий в тексте в скобках даётся их оригинальное написание (за исключением общеизвестных имён, встречающихся в энциклопедии, и имен, на которые даются ссылки в списке литературы).
- При упоминании иностранных учебных заведений, фирм, фирменных продуктов и т.д. в русской транслитерации в скобках должно быть дано их оригинальное написание.

ФАЙЛЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ В РЕДАКЦИЮ

Авторам необходимо направить в редакцию следующие файлы а) через сайт журнала (адрес: <https://journals.eco-vector.com/0869-5652/author/submit>; ниже будут упоминаться некоторые шаги процедуры подачи рукописи через сайт) или б) по электронной почте:

- 1) файл с полным текстом рукописи, подготовленный в программах MS Office или LaTeX (в форматах *.doc, *.docx или *.tex), содержащий всю информацию (включая изображения и таблицы), предназначенную к опубликованию (при подаче через сайт загружается на шаге 2 подачи рукописи);
- 2) файлы изображений в высоком разрешении (не менее 300 DPI) в форматах *.tiff, *.png или *.jpg; векторные изображения следует направлять в формате *.eps; каждый файл должен содержать одну иллюстрацию, если иллюстрация состоит из нескольких частей, все они должны быть сгруппированы в один файл с правильным расположением частей (эти файлы и файлы нижеперечисленных пунктов 3)–7) в случае подачи через сайт журнала загружаются на шаге 4 подачи рукописи);
- 3) файлы с таблицами; каждая таблица в отдельном файле вместе с её заголовком;
- 4) файл с отсканированным сопроводительным письмом от авторов, содержащим подписи каждого члена авторского коллектива (в формате *.pdf);
- 5) файл с отсканированным представлением рукописи от действительного члена РАН или иностранного члена РАН, заверенного его подписью (в формате *.pdf);
- 6) файл текста договора(ов) о передаче авторского права издательству, который автор(ы) должен(ны) сдать в редакцию вместе со статьёй; образец размещён на сайте по адресу <https://journals.eco-vector.com/0869-5652/about/submissions#copyrightNotice>;
- 7) дополнительные файлы.

В число дополнительных файлов могут входить следующие документы:

- Текст рукописи, переведённый на английский язык. Все сообщения, публикуемые в ДАН, одновременно выходят в английском переводе в отдельных сборниках издательства Pleiades Publishing по математике (Doklady Mathematics), физике (Doklady Physics), химии и химической технологии (Doklady Chemistry), физической химии (Doklady Physical Chemistry), биохимии и биофизике (Doklady Biochemistry & Biophysics), биологии (Doklady Biological Sciences) и наукам о Земле (Doklady Earth Sciences). Качество их перевода зависит от ясности и чёткости изложения материала на русском языке, а также использования в переводе адекватной терминологии. Редколлегия будет благодарна авторам, если они приложат к исходной рукописи список английских терминов, которые они считают целесообразным использовать, и другие пояснения переводчику. Авторы могут также приложить свою версию перевода статьи на английский язык.
- Дополнительные материалы к статье, которые редакция может опубликовать отдельно в электронном виде в сети Интернет. Эти материалы будут проиндексированы с указанием того же авторства, что и оригинальная статья, и размещены в открытом доступе на странице опубликованной статьи. Редакция может опубликовать в виде дополнительных материалов таблицы, изображения, медиа-контент (аудио- и видеозаписи).

При загрузке файлов через сайт (на шаге 4 процедуры подачи рукописи) на сайте журнала следует заполнить поле «Комментарий к файлу». Комментарий к файлу должен содержать информацию о файле. Например, «рис. 1».

НЕКОТОРЫЕ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ (полный текст правил представлен на сайте <https://journals.eco-vector.com/0869-5652>)

ФОРМАТ РУКОПИСИ

- Объём полного текста рукописи. «Доклады Академии наук» публикуют сообщения, занимающие не более 1/4 авторского листа (10 000 знаков с учётом пробелов). В этот объём входят текст, таблицы, библиография (не больше 15 источников). Нормативный объём статьи НЕ УЧИТЫВАЕТ объём текстов на английском языке, указанных ниже в разделе «Структура рукописи».
- Формат текста рукописи. Текст следует набирать через два интервала на страницах стандартного размера А4 с полями с левой стороны, размер шрифта 14 Pt; страницы должны быть пронумерованы. Выделения в тексте НЕЛЬЗЯ проводить подчёркиванием.

СТРУКТУРА РУКОПИСИ

- Код УДК. В самом начале статьи следует указать индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).
- Название статьи. Прописными буквами, полужирным шрифтом, выравнивание по центру, в конце без точки.
- Авторы. Указываются инициалы имени и отчества (с точкой), далее через пробел — фамилия. Курсивом, выравнивание по центру, в конце без точки. Если авторы публикации относятся к разным учреждениям, следует после всех фамилий надстрочко указать номер учреждения. Соответствующий номер ставится в круглых скобках перед названием учреждения.
- Учреждения. Необходимо привести ПОЛНОЕ официальное название учреждений (без сокращений). Перед названием каждого учреждения в верхнем регистре следует указать его номер — для соотнесения с соответствующими авторами. После названия каждого учреждения через запятую необходимо написать его адрес в формате: город, страна.
- Аннотация статьи должна обосновывать целесообразность публикации именно в «Докладах Академии наук». Объём текста аннотации не должен превышать 1000 знаков с учётом пробелов.
- Ключевые слова. Необходимо указать от 3 до 10 ключевых слов, способствующих индексированию статьи в поисковых системах. Рекомендуется использовать общепринятые термины.
- Полный текст на русском языке. Далее необходимо привести грамотный перевод на английский язык ряда перечисленных выше пунктов.
- Article title. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.
- Author names. Указываются имена, отчества и фамилии в соответствии с их написанием в системе ORCID. Курсивом, выравнивание по центру, в конце без точки. Если авторы публикации относятся к разным учреждениям, следует после всех фамилий надстрочко указать номер учреждения.
- Affiliation. Необходимо указывать ОФИЦИАЛЬНЫЕ АНГЛОЯЗЫЧНЫЕ НАЗВАНИЯ УЧРЕЖДЕНИЙ. Наиболее полный список названий учреждений и их официальной англоязычной версии можно найти на сайте РУНЭБ eLibrary.ru. Перед названием каждого учреждения в верхнем регистре следует указать его номер — для соотнесения с соответствующими авторами. После каждого названия учреждения через запятую необходимо написать его адрес в формате: город, страна.
- Abstract. Англоязычная версия аннотации статьи должна соответствовать русскоязычной и быть грамотной с точки зрения английского языка.
- Keywords. Для верного написания ключевых слов на английском рекомендуется использовать известные тезаурусы (например, тезаурус Национальной медицинской библиотеки США — Medical Subject Headings (MeSH), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh>).
- Авторы могут приложить список английских терминов, которые они считают необходимым использовать при переводе статьи на английский язык, и пояснения переводчику, а также свою версию перевода (см. выше пункт о подаваемых документах на шаге 4).
- Список литературы. В библиографии каждый источник следует помещать с новой строки под порядковым номером. Подробные правила оформления библиографии можно найти на сайте журнала. Наиболее важные из них следующие.
 - Список литературы приводится на отдельной странице.
 - В списке все работы перечисляются в порядке цитирования, а НЕ в алфавитном порядке.
 - Количество цитируемых работ — до 15 источников. Самоцитирование допускается в минимальном объёме (не более 30%).
 - В тексте статьи ссылки на источники приводятся в квадратных скобках арабскими цифрами без пробела: [1], [1, 2] или [5–7].
 - В библиографическом описании каждого источника приводятся фамилии авторов. В случае, если у публикации более 3-х авторов, то после 3-го автора необходимо поставить запятую (обязательно), затем через пробел сокращение «и др.» или «et al.».
 - Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.
- Информация об авторах. Последовательно указываются все авторы рукописи: ФИО (в этом разделе полностью), учёная степень, учёное звание, должность, место работы (включая город и страну). Отдельно следует выделить автора для связи с авторским коллективом, и только для него указать контактный действующий (!) телефон (только для связи с автором, не печатается в статье). Для КАЖДОГО автора необходимо указать: SPIN-код в e-library (формат: XXXX-XXXX), ORCID iD (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX) и контактный email. Полные имена всех авторов на английском языке.
- Дополнительная информация (на русском или на русском и английском языках):
 - Источники финансирования. Возможно указание источников финансирования, как научной работы, так и процесса публикации статьи (фонд и др., без размера финансирования).
 - Соблюдение этических стандартов. Авторам необходимо включить в данную рубрику следующую информацию (если это применимо) — подробнее см. на сайте журнала:
 - * Информация о конфликте интересов. Авторам необходимо раскрыть потенциальные и явные конфликты интересов, связанные с рукописью (подробнее — на сайте). Наличие конфликта интересов у одного или нескольких авторов НЕ является поводом для отказа в публикации статьи.
 - * Информацию о получении разрешения на проведение исследования с участием людей и/или животных (подробнее — на сайте).
 - * Информацию о получении информированного согласия от участников исследования (подробнее — на сайте).
 - Благодарности. Авторы могут выразить благодарность людям, способствовавшим получению результатов и публикации статьи в журнале, но не являющимся её авторами, а также организациям.