

СОДЕРЖАНИЕ

Том 484, номер 6, 2019

МАТЕМАТИКА

Детализация механизма эволюции особенностей в системе уравнений газовой динамики без давления

А. И. Аптекарев, Ю. Г. Рыков 655

Молекулярная динамика кластеров воды и потенциалы взаимодействия

Е. Д. Белега, Д. Н. Трубников 659

О классических решениях первой смешанной задачи для системы уравнений Власова—Пуассона в бесконечном цилиндре

Ю. О. Беляева, А. Л. Скубачевский 663

О достижимости оптимальных оценок скорости сходимости численных методов выпуклой оптимизации высоких порядков

*А. В. Гасников, Э. А. Горбунов, Д. А. Ковалев,
А. А. М. Мохаммед, Е. О. Черноусова* 667

ИНФОРМАТИКА

Реконструкция трёхмерных сцен на основе точных решений вариационной задачи регистрации мультисенсорных данных

А. В. Вохминцев, А. В. Мельников, К. В. Миронов, В. В. Бурлуцкий 672

ФИЗИКА

Исследование аморфных сплавов $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$) методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ^{11}B

*В. С. Покатилов, А. С. Сигов, А. О. Макарова,
В. В. Покатилов, Е. Ф. Певцов* 678

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Вариации деформационных параметров никелида титана при циклировании в интервале мартенситного превращения

В. Я. Ерофеев, М. В. Кабанов 682

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА, КОСМОЛОГИЯ

Особенности формирования приливного выступа ранней Луны

С. А. Воробаев, А. Ю. Днестровский, М. Я. Маров 686

ХИМИЯ

Динамика растворённого неорганического углерода и потоков CO_2 между водой и атмосферой в главном русле реки Обь

*И. И. Пипко, С. П. Пугач, О. Г. Савичев, И. А. Репина, Н. Е. Шахова,
Ю. А. Моисеева, К. В. Барсков, В. И. Сергиенко, И. П. Семилетов* 691

Новые фотохромные солевые спиропираны индолинового ряда

*А. Д. Пугачев, М. Б. Лукьянова, В. В. Ткачев, Б. С. Лукьянов,
Н. И. Макарова, Г. В. Шилов, И. А. Ростовцева, Л. С. Лапина,
В. И. Минкин, С. М. Алдошин*

698

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Получение методом электрораспыления капсул из биосовместимого сополимера лактида и гликолида с включением интерферона

*И. А. Хлусов, Э. В. Киблер, В. Л. Кудрявцева, С. И. Твердохлебов,
Е. Н. Больбасов, В. В. Ботвин, А. Д. Латыпов, Н. Д. Газатова,
Л. С. Литвинова, В. М. Бузник, Е. Л. Чойнзонов*

703

Формирование керамических полых стержней методом СВС-экструзии

А. П. Чижиков, А. М. Столин, П. М. Бажин, М. И. Алымов

709

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Наноструктуры на основе системы $ZrO_2-Y_2O_3$
для перовскитных солнечных элементов

*М. Ф. Вильданова, А. Б. Никольская, С. С. Козлов, О. К. Карягина,
Л. Л. Ларина, О. И. Шевалеевский, О. В. Альмяшева, В. В. Гусаров*

712

ГЕОЛОГИЯ

Минералого-геохимические типы и $^{190}Pt-^4He$ -возраст
железистой платины из россыпей бассейна р. Анабар
(Северо-Восток Сибирской платформы)

А. В. Округин, О. В. Якубович, А. М. Гедз, А. Л. Земнухов, П. О. Иванов

716

Редкие Th—Sc-минералы в пикритах Южного Урала
и их генетическое значение

С. Г. Ковалев, В. Н. Пучков, С. С. Ковалев, С. И. Высоцкий

721

Палеопротерозойский возраст карбонатных пород
и трондьемитов центральноприазовской серии:
Sr-изотопная хеостратиграфия и U—Pb-геохронология

А. Б. Кузнецов, С. Б. Лобач-Жученко, Т. В. Каулина, Г. В. Константинова

725

Связь глобальной вулканической активности и вариаций
скорости вращения Земли

Б. В. Левин, Е. В. Сасорова, В. Б. Гурьянов, В. В. Ярмолук

729

Экзотический Инимский блок Аргунского континентального
массива центрально-азиатского складчатого пояса:
результаты геохронологических (LA-ICP-MS) U—Th—Pb-
и изотопно-геохимических Sm—Nd-исследований

*Р. О. Овчинников, А. А. Сорокин, А. Б. Котов, Е. Б. Сальникова,
В. П. Ковач, А. П. Сорокин*

734

ГЕОХИМИЯ

Первые данные о природе и возрасте протолита высокобарических
тектонитов Енисейского кряжа: связь с ранним этапом
формирования палеоазиатского океана

И. И. Лиханов, К. А. Савко

739

ГЕОФИЗИКА

Сопоставление данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений с данными по механизмам очагов землетрясений

В. А. Гаврилов, А. В. Ландер, Ю. В. Морозова

745

ГЕОГРАФИЯ

Новые возможности дистанционной спектроскопии
поверхностных водных объектов

Б. Л. Сухоруков, А. М. Никаноров

750

ОКЕАНОЛОГИЯ

Особенности вихревого подавления волн цунами подводными барьерами

Б. В. Бошнятов, К. Н. Жильцов

755

БИОХИМИЯ, БИОФИЗИКА, МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

Стероидогенный эффект низкомолекулярного агониста рецептора
лютеинизирующего гормона при его введении крысам-самцам

А. А. Бахтюков, К. В. Деркач, Д. В. Дарьин, А. О. Шпаков

760

Оценка качества децеллюляризации и рецеллюляризации
тканеинженерных конструкций методом хемилюминесценции

*Е. А. Губарева, Е. В. Куевда, А. Х. Каде, И. М. Быков, И. И. Павлюченко,
Т. В. Гайворонская, А. Н. Сидоренко, О. В. Цымбалов, В. Г. Овсянников,
В. В. Мясникова, Д. И. Шашков, С. С. Джимаков*

764

Влияние магнитных полей и магнитного изотопа ^{25}Mg
на образование биоплёнок бактериями *E. coli*

У. Г. Летута, Т. А. Тихонова

768

Функциональный анализ роли коилина в устойчивости растений
картофеля *Solanum tuberosum* к вирусной инфекции и абиотическим
стрессам с использованием системы редактирования CRISPR/Cas9

*А. В. Махотенко, А. В. Хромов, Е. А. Снигирь, С. С. Макарова,
В. В. Макаров, Т. П. Супрунова, Н. О. Калинина, М. Э. Тальянский*

772

Белок врождённого иммунитета Tag7 после инкубации с лимфоцитами
стимулирует появление цитотоксических НК-клеток

Т. Н. Шарапова, Е. А. Романова, Л. П. Сащенко, Н. В. Гнучев, Д. В. Яшин

777

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

К анализу слабого двулокусного отбора по жизнеспособности
и квазиравновесия по сцеплению

В. П. Пасеков

781

Тематический указатель

786

Алфавитный указатель

794

Правила для авторов

799

CONTENTS

Volume 484, Number 6, 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

Detailed Description of the Evolution Mechanism for Singularities in the System of Pressureless Gas Dynamics

A. I. Aptekarev, Yu. G. Rykov 655

Molecular Dynamics of Water Clusters and Interaction Potentials

E. D. Belega, D. N. Trubnikov 659

On Classical Solutions to the First Mixed Problem for the Vlasov—Poisson System in an Infinite Cylinder

Yu. O. Belyaeva, A. L. Skubachevskii 663

Reachability of Optimal Convergence Rate Estimates for High-Order Numerical Convex Optimization Methods

A. V. Gasnikov, E. A. Gorbunov, D. A. Kovalev, A. A. M. Mokhammed, E. A. Chernousova 667

INFORMATICS

Reconstruction of Three-Dimensional Maps Based on Closed-Form Solutions of the Variational Problem of Multisensor Data Registration

A. V. Vokhmintsev, A. V. Melnikov, K. V. Mironov, V. V. Burlutskiy 672

PHYSICS

^{11}B NMR Study of Amorphous Alloys $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$)

V. S. Pokatilov, A. S. Sigov, A. O. Makarova, V. V. Pokatilov, E. F. Pevtsov 678

TECHNICAL PHYSICS

Variations of the Strain Parameters of Titanium Nickelide during Martensitic Transformation Cycling

V. Ya. Erofeev, M. V. Kabanov 682

ASTRONOMY, ASTROPHYSICS, COSMOLOGY

Features of the Fossil Tidal Bulge for the Early Moon

S. A. Voropaev, A. Yu. Dnestrovskii, M. Ya. Marov 686

CHEMISTRY

Dynamics of Dissolved Inorganic Carbon and CO_2 Fluxed between the Water and the Atmosphere in the Main Channel of the Öb River

I. I. Pipko, S. P. Pugach, O. G. Savichev, I. A. Repina, N. E. Shakhova, Y. A. Moiseeva, K. V. Barskov, V. I. Sergienko, I. P. Semiletov 691

New Photochromic Salt Spiroprans of Indoline Series

A. D. Pugachev, I. B. Lukyanova, V. V. Tkachev, B. S. Lukyanov, N. I. Makarova, G. V. Shilov, I. A. Rostovtseva, L. S. Lapshina, V. I. Minkin, S. M. Aldoshin 698

CHEMICAL TECHNOLOGY

Electrospray Preparation of Biocompatible Lactide—Glycolide Copolymer Capsules with Incorporation of Interferon

I. A. Khlusov, E. V. Kibler, V. L. Kudryavtseva, S. I. Tverdokhlebov, E. N. Bolbasov, V. V. Botvin, A. D. Latypov, N. D. Gazatova, L. S. Litvinova, V. M. Buznik, E. L. Choyznzonov

703

Production of Hollow Ceramic Rods by SHS Extrusion

A. P. Chizhikov, A. M. Stolin, P. M. Bazhin, M. I. Alymov

709

PHYSICAL CHEMISTRY

Nanostructured $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$ -Based Systems for Perovskite Solar Cells

M. F. Vildanova, A. B. Nikolskaia, S. S. Kozlov, O. K. Karyagina, L. L. Larina, O. I. Shevaleevskiy, O. V. Almjasheva, V. V. Gusarov

712

GEOLOGY

Mineralogical-Geochemical Types and $^{190}\text{Pt}\text{—}^4\text{He}$ Age of Ferroan Platinum of Placers of the Anabar River Basin, Northeastern Part of Siberian Platform

A. V. Okrugin, O. V. Yakubovich, A. M. Gedz, A. L. Zemnukhov, P. O. Ivanov

716

Rare Th—Sc Minerals in Picrites of the Southern Urals and their Genetic Value

S. G. Kovalev, V. N. Puchkov, S. S. Kovalev, S. I. Vysotsky

721

Paleoproterozoic Age of Carbonates and Trondhjemites of the Central Azov Group: Sr-Isotope Chemostratigraphy and U—Pb Geochronology

A. B. Kuznetsov, S. B. Lobach-Zhuchenko, T. V. Kaulina, G. V. Konstantinova

725

The Relationship between Global Volcanic Activity and Variations in the Velocity of Earth's Rotation

B. W. Levin, E. V. Sasorova, V. B. Gurianov, V. V. Yarmolyuk

729

Exotic Inim Block in the Agrun Continental Superterrane of the Central Asian fold Belt: Results of U—Th—Pb Geochronological (LA-ICP-MS) and Sm—Nd Isotopic-Geochemical Studies

R. O. Ovchinnikov, A. A. Sorokin, A. B. Kotov, E. B. Sal'nikova, V. P. Kovach, A. P. Sorokin

734

GEOCHEMISTRY

First Data on the Nature and Age of the Protolith of High-Pressure Tectonites of Yenisei Ridge: A Link to the Early Stage of Formation of the Paleoasian Ocean

I. I. Likhanov, K. A. Savko

739

GEOFYSICS

Comparison of Borehole Geoacoustic and Electromagnetic Data with Data of Earthquake Focal Mechanisms

V. A. Gavrilov, A. V. Lander, Yu. V. Morozova

745

GEOGRAPHY

New Possibilities of Remote Spectrometry of Surface Water Bodies

B. L. Sukhorukov, A. M. Nikanorov

750

OCEANOLOGY

Features of Vortical Suppression of Tsunami Waves Underwater Barriers

B. V. Boshenyatov, K. N. Zhiltsov

755

BIOCHEMISTRY, BIOPHYSICS, MOLECULAR BIOLOGY

The Steroidogenic Effect of a Low-Molecular Agonist of Luteinizing Hormone Receptor in the Course of Its Administration to Male Rats

A. A. Bakhtyukov, K. V. Derkach, D. V. Dar'in, A. O. Shpakov

760

Quality Assessment of Decellularization and Recellularization of Tissue-Engineering Construction by the Chemiluminescence Method

E. A. Gubareva, E. V. Kuevda, A. Kh. Kale, I. M. Bykov, I. I. Pavlyuchenko, T. V. Gaivoronskaya, A. N. Sidorenko, O. V. Tsybalov, V. G. Ovsyannikov, V. V. Myasnikova, D. I. Shashkov, S. S. Dzhimak

764

Magnetic Fields and Magnetic Isotope ^{25}Mg Effects on Biofilms Formation by Bacteria *E. coli*

U. G. Letuta, T. A. Tikhonova

768

Functional Analysis of Coilin in Virus Resistance and Stress Tolerance of Potato *Solanum tuberosum* Using CRISPR/Cas9 Editing

A. V. Makhotenko, A. V. Khromov, E. A. Snigir, S. S. Makarova, V. V. Makarov, T. P. Suprunova, N. O. Kalinina, M. E. Taliansky

772

Innate Immune Protein Tag7 Stimulates the Appearance of Cytotoxic NK Cells after Incubation with Lymphocytes

T. N. Sharapova, E. A. Romanova, L. P. Sashchenko, N. V. Gnuchev, D. V. Yashin

777

GENERAL BIOLOGY

To the Analysis of Weak Two-Locus Viability Selection and Quasi Linkage Equilibrium

V. P. Pasekov

781

Subject Index

786

Alphabetic Index

794

Author Standards

799

УДК 517.956

ДЕТАЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ЭВОЛЮЦИИ ОСОБЕННОСТЕЙ В СИСТЕМЕ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ БЕЗ ДАВЛЕНИЯ

Член-корреспондент РАН А. И. Аптекарев*, Ю. Г. Рыков**

Поступило 03.09.2018 г.

Система уравнений газовой динамики без давления представляет собой гидродинамически обоснованное обобщение системы уравнений, состоящей из векторного уравнения Бюргерса в пределе исчезающей вязкости и закона сохранения массы. Последняя система уравнений интенсивно использовалась, в частности, в астрофизике для описания крупномасштабной структуры Вселенной. Решения векторного уравнения Бюргерса содержат интересную динамику особенностей, которая может описывать процессы концентрации. Однако эта динамика не удовлетворяет закону сохранения импульса, что не позволяет относиться к ней как к динамике материальных объектов. В настоящем сообщении исследуется динамика особенностей, сохраняющая импульс, на основе системы уравнений газовой динамики без давления. Эта динамика оказывается более разнообразной и сложной, однако для неё также возможно сформулировать вариационный подход, для которого в работе получены основные принципы и соотношения.

Ключевые слова: газовая динамика без давления, сильные особенности, соотношения Гюгонио, вариационное представление, процессы концентрации.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846655-658>

Система уравнений газовой динамики без давления выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_t + \operatorname{div}_x(\rho \mathbf{U}) &= 0, \\ (\rho \mathbf{U})_t + \operatorname{div}_x(\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) &= 0, \quad x \in \mathbb{R}^l, t \in \mathbb{R}_+. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\rho(t, \mathbf{x})$ — плотность среды, $\mathbf{U}(t, \mathbf{x})$ — вектор скорости, $\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}$ обозначает тензорное произведение, а div_x матрицы — вектор div_x её строк. Система (1) дополняется начальными условиями $\rho(0, \mathbf{x}) = \rho_0(\mathbf{x}) \in C(\mathbb{R}^l)$, $\mathbf{U}(0, \mathbf{x}) = \mathbf{U}_0(\mathbf{x}) \in C(\mathbb{R}^l)$. Для определённости мы будем рассматривать (1) в случае пространственной размерности $l = 2$ и $l = 3$, хотя описанная ниже методология, вообще говоря, применима в случае любой размерности.

Хорошо известно, что система (1) допускает наличие сильных особенностей, характеризующихся наличием сильных разрывов у вектора скорости и дельта-особенностей на многообразиях разной размерности у плотности. Описание эволюции таких особенностей представляет основной интерес в изучении (1) и связанных с ней систем уравнений. В случае гладких решений система (1) может быть сведена к системе уравнений, состоящей из первого уравнения (1) — закона сохранения массы — и век-

торного уравнения Бюргерса—Хопфа (т.е. уравнения Бюргерса в пределе исчезающей вязкости).

Если дополнительно потребовать выполнения условия $\nabla \times \mathbf{U} = 0$, то $\mathbf{U}(t, \mathbf{x}) = \nabla \Phi(t, \mathbf{x})$, и векторное уравнение Бюргерса—Хопфа может быть записано в виде уравнения Гамильтона—Якоби для потенциала $\Phi(t, \mathbf{x})$:

$$\frac{\partial \Phi(t, \mathbf{x})}{\partial t} + \frac{\nabla \Phi(t, \mathbf{x}) \cdot \nabla \Phi(t, \mathbf{x})}{2} = 0. \quad (2)$$

Для уравнения (2) и его обобщений на общий выпуклый гамильтониан изучены вязкие решения, включая тонкие вопросы распространения векторного поля скоростей на пространственно-временные точки, находящиеся внутри особенностей разных размерностей (см. [1–3]). При этом использовалась вариационная трактовка вязких решений уравнений типа Гамильтона—Якоби. Этот результат, в частности, оказался востребованным в астрофизических приложениях (см. обзорную статью [4]), где всё же отмечалось, что в описанной модели не выполняется закон сохранения импульса. Другой подход к построению обобщённых решений на основе вариационного принципа для уравнений/систем типа Бюргерса—Хопфа ($l = 1$) см. в [5], многомерное обобщение этого подхода см. в [6].

Запись системы (1) основана на законах сохранения массы и импульса, однако, как показано в [7, 8], эволюция особенностей (1) уже не имеет гамильтонов характер, и её описание фактически представляет собой обобщение соотношений Гюго-

Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: aptekaa@keldysh.ru**E-mail: yu-rykov@yandex.ru

нию для нестрогой гиперболической системы законов сохранения (1). Ввиду того что особенности возникают на многообразиях разных размерностей, задача получения согласованного обобщения соотношений Югонио является нетривиальной. Тем не менее результаты работы [9], полученные для двумерного случая, указывают путь, на котором возможны формулировка вариационного принципа для (1) и описание на его основе процесса концентрации материи. В настоящей работе приводится строгая постановка задачи об описании эволюции особенностей для (1) в случае двух и трёх пространственных переменных на основании вариационного представления слабых решений.

1. КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ВАРИАЦИОННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В ДВУМЕРНОМ СЛУЧАЕ

Как хорошо известно, в случае одной пространственной переменной для получения обобщённых решений системы (1) оказывается достаточным найти точки $y(t, x)$ глобального минимума функции

$$J(t, x, y) = \int_0^y \left[u_0(s) - \frac{x-s}{t} \right] \rho_0(s) ds, \quad (3)$$

по которым обобщённое решение в точке (t, x) однозначно восстанавливается. Если таких точек глобального минимума несколько, то это означает наличие в решении разрыва с той или иной структурой.

В работе [9] показано, что в двумерном случае необходимо рассматривать вектор-функционал, $i = 1, 2$:

$$\begin{aligned} J_i &\equiv \iint_A \left[u_{i0}(a, b) - \frac{x_i - \bar{a}_i}{t} \right] \rho_0(a, b) dadb \equiv \\ &\equiv \iint_A X_i(a, b) \frac{\partial(a, b)}{\partial(\tau, s)} d\tau ds, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\bar{a}_1 = a$, $\bar{a}_2 = b$, $\frac{\partial(a, b)}{\partial(\tau, s)} \equiv (a_\tau b_s - b_\tau a_s)$, A — некоторая область в лагранжевых переменных (a, b) , а $(a(\tau, s), b(\tau, s))$ — параметризация этой области. Если определить $\frac{\delta J_i}{\delta A}$ — вариацию J_i по области A ,

то при фиксированных $(t, \mathbf{x})$ условия $\frac{\delta J_i}{\delta A} = 0$, $i = 1, 2$, определяют элемент кривой Γ_x в пространстве $\mathbf{x}$, на которой образуется дельта-функция плотности, при этом будет выполнен закон сохранения импульса (см. [8, 9]). В пространстве (a, b) этому элементу кривой Γ_x будет также соответствовать некоторая кривая $\Gamma_{(a,b)}$ вместе с инфинитезимальным элементом площади. Вещество, содержащееся

в этом инфинитезимальном элементе площади в начальный момент времени, в момент времени t будет сконцентрировано на кривой Γ_x . Если при фиксированном $(t, \mathbf{x})$ имеется несколько таких кривых $\Gamma_{(a,b)}$, которые ограничивают некоторую область $D(t)$, то условия

$$\iint_{D(t)} X_i(a, b) dadb = 0, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

определяют движение особенности с дельта-функцией плотности в точке $(t, \mathbf{x})$ и обеспечивают выполнение закона сохранения импульса. Масса “тяжёлой” точки равна $\iint_{D(t)} \rho_0 dadb$.

Теперь перейдём к более конкретному математическому описанию рассмотренного механизма.

2. КОНКРЕТИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ЭВОЛЮЦИИ ОСОБЕННОСТЕЙ В ДВУМЕРНОМ СЛУЧАЕ

На некотором компакте $K \subset \mathbb{R}^2$ рассмотрим пространство $C^1(K)$ непрерывно дифференцируемых вектор-функций $(a(\tau, s), b(\tau, s))$. Определим следующие вектор-функции, $i = 1, 2$, $X_i(a, b)$ определено в (4):

$$\begin{aligned} J_i(\tau, s) &\equiv \iint_{\bar{A}} X_i(a, b) \frac{\partial(a, b)}{\partial(\alpha, \beta)} d\alpha d\beta, \\ \Phi_i(\tau, s) &\equiv \int \bar{X}_i(a, b) \frac{\partial(a, b)}{\partial(\alpha, s)} d\alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Будем рассматривать $\mathbf{J} = (J_1, J_2)$ и $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2)$ как отображения $C^1(K)$ в пространство непрерывных функций $C(K)$.

Определение 1. Будем говорить, что в точке $(t, \mathbf{x})$ возможно существование особенности размерности 1 в пространстве $\mathbf{x}$, если для отображения Φ из (6) существует такая точка $(a(\tau, s), b(\tau, s))$, а также значения $\bar{s}, \tau_1, \tau_2$, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_i}{\partial \tau}(\tau_1, \bar{s}) &= \frac{\partial \Phi_i}{\partial \tau}(\tau_2, \bar{s}) = 0, \\ \Phi_i(\tau_1, \bar{s}) &= \Phi_i(\tau_2, \bar{s}); \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (7)$$

Замечание 1. При соответствующих ограничениях на рост функций $\rho_0(\mathbf{x}), U_0(\mathbf{x}), (a(\tau, s), b(\tau, s))$ условия (7) можно интерпретировать как поиск глобальных минимумов каждой из функций Φ_i , являющихся аналогами (3), что соответствует процедуре решения одномерной системы (1).

Определение 2. Точки $(a(\tau, s), b(\tau, s))$ и $(\alpha(\tau, s), \beta(\tau, s))$, в которых возможно существование

особенности размерности 1 в пространстве x , называются эквивалентными, если $\alpha(\tau, \bar{s}) = a(\tau, \bar{s})$; $\beta(\tau, \bar{s}) = b(\tau, \bar{s})$ вместе со своими производными при $\tau \in [\tau_1, \tau_2]$.

Утверждение 1. Если для части поверхности Γ в пространстве (t, x) пересечение классов эквивалентности для каждой точки рассматриваемой части Γ непусто, то эта часть поверхности Γ является одномерной особенностью для (1) при фиксированном t .

Справедливость утверждения 1 следует из эквивалентности равенств (7) законам движения кривой, несущей дельта-функцию плотности, которые были получены в [8].

Пусть теперь для некоторой точки (t, x) существует M неэквивалентных точек $(a_m(\tau, s), b_m(\tau, s))$, для которых возможно существование особенностей размерности 1 в пространстве x , с соответствующими значениями $\bar{s}_m, \tau_{1m}, \tau_{2m}, m = 1, 2, \dots, M$. Пусть последовательные кривые $(a_m(\tau, \bar{s}_m), b_m(\tau, \bar{s}_m))$, $\tau \in [\tau_{1m}, \tau_{2m}]$, $m = 1, 2, \dots, M$, образуют замкнутую область $D(t)$.

Определение 3. Будем говорить, что в точке (t, x) возможно существование особенности размерности 0 в пространстве x , если для области $D(t)$ существует такая параметризация $(a_D(\tau, s), b_D(\tau, s))$, $\tau \in [\tau_{1D}, \tau_{2D}]$, $\tau_{1D} = \min_m \{\tau_{1m}, \tau_{2m}\}$, $\tau_{2D} = \max_m \{\tau_{1m}, \tau_{2m}\}$, $s \in [s_{1D}, s_{2D}]$, которая для каждого $m = 1, 2, \dots, M$ эквивалентна $(a_m(\tau, \bar{s}_m), b_m(\tau, \bar{s}_m))$, $\tau \in [\tau_{1m}, \tau_{2m}]$ при фиксированном значении s .

Утверждение 2. Если для части кривой L в пространстве (t, x) возможно существование особенности размерности 0 в пространстве x и выполнено равенство

$$J_i(\tau_{1D}, s_{1D}) = J_i(\tau_{2D}, s_{2D}), \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

то эта часть кривой L является нульмерной особенностью в пространстве x для (1) при фиксированном t .

Замечание 2. Соотношения (8) являются другой формой записи соотношений (5).

Справедливость утверждения 2 следует из эквивалентности равенств (8) законам движения точки, несущей дельта-функцию плотности, что было показано в [9].

3. ОБОБЩЕНИЕ НА ТРЁХМЕРНЫЙ И ОБЩИЙ МНОГОМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ

Для трёхмерного случая иерархию особенностей можно строить по аналогии с разделом 2. Используемые ниже обозначения являются естественным

обобщением обозначений раздела 2 на трёхмерный случай.

Введём следующие наборы функций: $\mathbf{I} = (I_1, I_2, I_3)$, $\mathbf{J} = (J_1, J_2, J_3)$ и $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3)$, которые будут рассматриваться как отображения $C^1(K)$ в $C(K)$, $K \subset \mathbb{R}^3$ — некоторый компакт, $i = 1, 2, 3$:

$$I_i \equiv \int_{\tau_1}^{\tau_2} J_i(\tau, s, \gamma) d\gamma, \quad J_i \equiv \int_{\beta_1}^{\beta_2} \Phi_i(\tau, \beta, p) d\beta, \quad (9)$$

$$\Phi_i(\tau, s, p) \equiv \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} X_i(a, b, c) \frac{\partial(a, b, c)}{\partial(\alpha, s, p)} d\alpha.$$

Определение 4. Будем говорить, что в точке (t, x) возможно существование особенности коразмерности 1 в пространстве x , если для отображения Φ существует такая точка $(a(\tau, s, p), b(\tau, s, p), c(\tau, s, p))$, а также значения $\bar{s}, \bar{p}, \tau_1, \tau_2$, что

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial \tau}(\tau_1, \bar{s}, \bar{p}) = \frac{\partial \Phi_i}{\partial \tau}(\tau_2, \bar{s}, \bar{p}) = 0, \quad (10)$$

$$\Phi_i(\tau_1, \bar{s}, \bar{p}) = \Phi_i(\tau_2, \bar{s}, \bar{p}), \quad i = 1, 2, 3.$$

Определение 5. Точки $(a(\tau, s, p), b(\tau, s, p), c(\tau, s, p))$ и $(\alpha(\tau, s, p), \beta(\tau, s, p), \gamma(\tau, s, p))$, в которых возможно существование особенности коразмерности 1 в пространстве x , называются эквивалентными, если $\alpha(\tau, \bar{s}, \bar{p}) = a(\tau, \bar{s}, \bar{p})$; $\beta(\tau, \bar{s}, \bar{p}) = b(\tau, \bar{s}, \bar{p})$; $\gamma(\tau, \bar{s}, \bar{p}) = c(\tau, \bar{s}, \bar{p})$ вместе со своими производными при $\tau \in [\tau_1, \tau_2]$.

Утверждение 3. Если для части гиперповерхности Γ коразмерности 1 в пространстве (t, x) пересечение классов эквивалентности для каждой точки рассматриваемой части Γ непусто, то эта часть гиперповерхности Γ является особенностью коразмерности 1 в пространстве x для (1) при фиксированном t .

Замечание 3. Соотношения (9), (10) соответствуют соотношениям (6), (7).

Пусть теперь для некоторой точки (t, x) существует M неэквивалентных точек $(a_m(\tau, s, p), b_m(\tau, s, p), c_m(\tau, s, p))$, для которых возможно существование особенностей коразмерности 1 в пространстве x , с соответствующими значениями $\bar{s}_m, \bar{p}_m, \tau_{1m}, \tau_{2m}, m = 1, 2, \dots, M$. Пусть последовательные кривые $(a_m(\tau, \bar{s}_m, \bar{p}_m), b_m(\tau, \bar{s}_m, \bar{p}_m), c_m(\tau, \bar{s}_m, \bar{p}_m))$, $\tau \in [\tau_{1m}, \tau_{2m}]$, $m = 1, 2, \dots, M$, образуют замкнутую кривую в $\mathbb{R}^3$, на которую можно натянуть некоторую поверхность $D(t)$.

Определение 6. Будем говорить, что в точке (t, x) возможно существование особенности коразмерности 2 в пространстве x , если существует соответствующая поверхность $D(t)$, для которой существует такая параметризация $(a_D(\tau, s, p),$

$b_D(\tau, s, p), c_D(\tau, s, p)), \tau \in [\tau_{1D}, \tau_{2D}], \tau_{1D} = \min_m \{\tau_{1m}, \tau_{2m}\}, \tau_{2D} = \max_m \{\tau_{1m}, \tau_{2m}\}, s \in [s_{1D}, s_{2D}], p = \text{const}$, которая для каждого $m = 1, 2, \dots, M$ эквивалентна $(a_m(\tau, \bar{s}_m, \bar{p}_m), b_m(\tau, \bar{s}_m, \bar{p}_m), c_m(\tau, \bar{s}_m, \bar{p}_m)), \tau \in [\tau_{1m}, \tau_{2m}]$ при некоторых фиксированных значениях s и p .

Утверждение 4. Если для части поверхности Δ коразмерности 2 в пространстве $(t, \mathbf{x})$ возможно существование особенности коразмерности 2 в пространстве $\mathbf{x}$ и выполнено равенство

$$J_i(\tau_{1D}, s_{1D}, p) = J_i(\tau_{2D}, s_{2D}, p), \quad i = 1, 2, 3, \quad (11)$$

то эта часть поверхности Δ является особенностью коразмерности 2 в пространстве $\mathbf{x}$ для (1) при фиксированном t .

Определение 7. Будем говорить, что в точке $(t, \mathbf{x})$ возможно существование особенности коразмерности 3 в пространстве $\mathbf{x}$, если существует несколько поверхностей $D_n(t), n = 1, 2, \dots, N$, ограничивающих объём $V(t)$ и имеющих соответствующие параметризации, и существует такая параметризация объёма $V(t)$ $(a_V(\tau, s, p), b_V(\tau, s, p), c_V(\tau, s, p)), \tau \in [\tau_{1V}, \tau_{2V}], s \in [s_{1V}, s_{2V}], p \in [p_{1V}, p_{2V}]$, которая для каждого $n = 1, 2, \dots, N$ эквивалентна параметризации соответствующей поверхности $D_n(t)$.

Утверждение 5. Если для части кривой L в пространстве $(t, \mathbf{x})$ возможно существование особенности коразмерности 3 в пространстве $\mathbf{x}$ и выполнено равенство

$$I_i(\tau_{1V}, s_{1V}, p_{1V}) = I_i(\tau_{2V}, s_{2V}, p_{2V}), \quad i = 1, 2, 3, \quad (12)$$

то эта часть кривой L является особенностью коразмерности 3 в пространстве $\mathbf{x}$ для (1) при фиксированном t .

Замечание 4. Соотношения (12) соответствуют соотношениям (8), а соотношения (11) описывают промежуточный тип особенностей, связанный с трёхмерностью пространства. Количество промежуточных типов особенностей будет увеличиваться в соответствии с увеличением размерности пространства $\mathbf{x}$.

Из описанной выше процедуры можно построить иерархию особенностей и в многомерном случае, вводя необходимые определения и формулируя утверждения по аналогии.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке по Программе № 1 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богаевский И.А. // Мат. сб. 2006. Т. 197. № 12. С. 11–42.
2. Khanin K., Sobolevski A. // Phil. Trans. Roy. Soc. A 2010. V. 368. P. 1579–1593.
3. Khanin K., Sobolevski A. // Arch. Ration. Mech. Anal. 2016. V. 219. Iss. 2. P. 861–885.
4. Гурбатов С.Н., Саичев А.И., Шандарин С.Ф. // УФН. 2012. Т. 182. № 3. С. 233–261.
5. Aptekarev A.I., Rykov Yu.G. // Rus. J. Math. Phys. 2006. V. 13. № 1. С. 4–12.
6. Aptekarev A.I. // Contemp. Math. 2016. V. 661. P. 167–186.
7. E W., Rykov Yu.G., Sinai Ya.G. // Commun. Math. Phys. 1996. V. 177. P. 349–380.
8. Rykov Yu.G. // Boll. U.M.I. Sezione B. 8. 2002. V. 5B. P. 55–78.
9. Рыков Ю.Г. // Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 94. 14 с.

DETAILED DESCRIPTION OF THE EVOLUTION MECHANISM FOR SINGULARITIES IN THE SYSTEM OF PRESSURELESS GAS DYNAMICS

Corresponding Member of the RAS A. I. Aptekarev, Yu. G. Rykov

Received September 3, 2018

The system of pressureless gas dynamics is a hydrodynamically justified generalization of the system consisting of the Burgers vector equation in the limit of vanishing viscosity and the mass conservation law. The latter system of equations was intensively used, in particular, in astrophysics to describe the large scale structure of the Universe. The solutions of the vector Burgers equation involve interesting dynamics of singularities, which can describe concentration processes. However, this dynamics does not satisfy the law of momentum conservation, which prevents us from treating it as dynamics of material objects. In this paper, momentum-conserving dynamics of singularities is investigated on the basis of the pressureless gas dynamics system. Such dynamics turns out to be more diverse and complex, but it is also possible to formulate a variational approach, for which the basic principles and relations are obtained in the work.

Keywords: pressureless gas dynamics, strong singularities, Hugoniot relations, variational representation, concentration processes.

УДК 519.6

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИНАМИКА КЛАСТЕРОВ ВОДЫ И ПОТЕНЦИАЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Е. Д. Белега*, Д. Н. Трубников**

Представлено академиком РАН Б.Н. Четверушкиным 14.09.2018 г.

Поступило 24.09.2018 г.

Методом молекулярной динамики проведён анализ динамических характеристик кластеров воды в твёрдой и жидкой фазе. Предложен критерий выбора потенциала взаимодействия, который основан на распределениях потенциальной энергии молекул кластера в разных фазах. Показана связь полученных распределений с динамикой и структурой сетки водородных связей кластера.

Ключевые слова: молекулярная динамика, кластеры воды, октамер воды, фазовые превращения, критерии фазы, потенциал взаимодействия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846659-662>

Кластеры как системы конечных размеров обладают характеристиками, отличными от свойств макроскопических тел. Изучение динамических характеристик кластеров позволяет понять, как устроено массивное вещество на молекулярном уровне. Особый интерес вызывают кластеры молекул воды, которые пристально изучаются специалистами разных областей знаний: физики, химии, биологии [1]. Зависимость свойств кластеров воды от числа частиц позволяет установить, как изменяются свойства вещества при переходе от молекул к конденсированному состоянию, при каких размерах кластер начинает проявлять свойства кристалла льда. Метод молекулярной динамики даёт возможность проследить за движением каждой частицы в кластере и получить информацию о его структурных и энергетических свойствах. Для изучения фазовых переходов в кластерах воды используются три типа параметров, которые основываются на изменениях структурных, динамических и термодинамических свойств. Пороговое значение индекса Линдемана [2], который характеризует отклонение среднеквадратичного расстояния между частицами в кластере от равновесного, — популярный критерий фазового перехода, принятый в теории кластеров начиная с 1987 г. [3]. Что же касается критериев фазы (твёрдой или жидкой), то для кластеров воды всё сводилось к описанию более или менее компактных секторов водородных связей и большему или меньшему отклонению молекул воды в кластере от положений равновесия. В связи с этим в недавней работе [4] был

предложен динамический критерий фазы (твёрдой и жидкой) кластера, построенный на распределениях потенциальной энергии молекул воды, а не кластера в целом. Для этого использовалась модель, описывающая динамику октамера воды — наименьшего кластера, претерпевающего фазовый переход [5, 6], с применением потенциала жёсткого типа TIP4P [7]. Следует отметить, что вопрос выбора потенциала взаимодействия между молекулами воды остаётся открытым, так как каждый из потенциалов описывает только часть свойств воды. Среди эмпирических потенциалов взаимодействия наряду с потенциалом TIP4P можно выделить потенциалы жёсткого типа TIP3P [7], TIP5P [8], SPC [9] и SPC/E [10], которые хорошо описывают тетраэдрическую координацию молекул и, следовательно, льдоподобные кластеры. Данная работа посвящена исследованию динамических характеристик октамера воды в зависимости от потенциала взаимодействия методом молекулярной динамики. Цель работы — выбор потенциала, который адекватно описывает свойства кластера в разных фазах на молекулярном уровне.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Пусть кластер состоит из N_a атомов. Обозначим через $\mathbf{r}_i(t)$ — радиус-векторы, через $\mathbf{p}_i(t)$ — векторы импульсов, m_i — массы атомов кластера ($i = 1, 2, \dots, N_a$, $t \in [0, t_0]$, t_0 — время наблюдения за траекторией). Тогда полная энергия системы примет вид

$$H(\mathbf{p}_1(t), \dots, \mathbf{p}_{N_a}(t), \mathbf{r}_1(t), \dots, \mathbf{r}_{N_a}(t)) = \sum_{i=1}^{N_a} \frac{\mathbf{p}_i^2(t)}{2m_i} + U(\mathbf{r}_1(t), \dots, \mathbf{r}_{N_a}(t)), \quad (1)$$

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

*E-mail: edbelega@gmail.com

**E-mail: tdn@phys.chem.msu.ru

где $U(\mathbf{r}_1(t), \dots, \mathbf{r}_{N_a}(t))$ — потенциальная энергия взаимодействия между частицами. Для решения уравнений движения, описываемых гамильтонианом (1), была применена численная схема Верле [11] и RATTLE-алгоритм, который учитывает жёсткие ковалентные связи в кластере [12]. Генерацию начальных состояний методом Монте-Карло можно сформулировать следующим образом: найти такие координаты $\mathbf{r}_i(0)$ и импульсы $\mathbf{p}_i(0)$ частиц, чтобы выполнялись законы сохранения полной энергии (1), полного импульса $\mathbf{P}$

$$\sum_{i=1}^{N_a} (\mathbf{p}_i(0)) = \mathbf{P}$$

и суммарного момента импульса системы $\mathbf{L}$

$$\sum_{i=1}^{N_a} [\mathbf{x}_i(0), \mathbf{p}_i(0)] = \mathbf{L}.$$

В данном численном эксперименте предполагается, что кластер находится в системе центра масс и не вращается, поэтому импульс и угловой момент кластера полагаются равными нулю. Следует отметить, что использование микроканонического ансамбля позволяет проследить за движением системы на молекулярном уровне, что может оказаться невозможным в случае канонического подхода к задаче [13].

Для генерации начальных состояний кластера методом Монте-Карло предложен следующий алгоритм:

1. Методом постепенного вымораживания системы производится поиск минимума потенциальной энергии $U(0)$. В результате определяются начальные координаты атомов $\mathbf{r}_i(0)$ и вычисляется начальная кинетическая энергия $E_k(0)$ кластера как $E_k(0) = H - U(0)$.

2. Методом Монте-Карло генерируются векторы начальных импульсов колебательного движения $\mathbf{p}_i(0)$ при условии $\mathbf{P} = 0$, $\mathbf{L} = 0$; и начальная энергия колебаний равна $E_k(0)$.

Для каждого потенциала получена начальная структура октамера воды кубической симметрии S_4 , которая соответствует минимуму полной энергии модели. Существование водородной связи в кластере определялось с помощью геометрического критерия [14]. В численном эксперименте расчётное время траектории достигало 1 нс, шаг интегрирования — 1 фс; при этом отклонение полной энергии системы от начальной не превышало заданного значения в 10^{-3} эВ. Для статистики использовалось 10 траекторий с одной и той же начальной энергией системы.

Порог изомеризации сетки водородных связей фиксировался по индексу Линдемана $\delta(\text{OO})$:

$$\delta(\text{OO}) = \frac{2}{N_m(N_m - 1)} \sum_{i < j} \frac{(\langle r_{ij}^2 \rangle - \langle r_{ij} \rangle^2)^{1/2}}{\langle r_{ij} \rangle}, \quad (2)$$

где r_{ij} — расстояние между i -м и j -м атомами кислорода; N_m — число молекул воды в кластере. Считается, что кластер воды претерпевает плавление, если $\delta(\text{OO}) \geq 0,1$ [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для S_4 -октамера воды были получены следующие значения энергии глобального минимума: TIP3P: $U = -3,05$ эВ; TIP4P: $U = -3,17$ эВ; TIP5P: $U = -3,12$ эВ; SPC: $U = -3,15$ эВ; SPC/E: $U = -3,43$ эВ. Индекс Линдемана, рассчитанный по формуле (2), использовался для выделения области полной энергии системы, которую можно идентифицировать как твёрдую фазу кластера с $\delta(\text{OO}) < 0,1$. Предполагалось, что жидкая фаза кластера соответствует области полной энергии системы, где индекс Линдемана практически не изменяется. График зависимости индекса Линдемана от полной энергии октамера с TIP4P-потенциалом представлен в более ранней работе [4]. Для других потенциалов, используемых в данной работе, обнаружено, что пороговые энергии изомеризации близки по своему значению. Это может быть объяснено тем фактом, что некубические структуры октамера обладают существенно меньшей энергией связи по сравнению с кубической.

Для каждого из потенциалов рассчитывались усреднённые по траектории распределения потенциальной энергии молекул в кластере. Результаты, представленные на рис. 1 и 2, показывают, что в твёрдой фазе кластера распределения потенциальной энергии молекул, участвующих в ДАА- (одной донорной и двух акцепторных) и ДДА- (двух донорных и одной акцепторной) связях, существенно различаются при описании взаимодействия между молекулами TIP4P-потенциалом (рис. 1). Для TIP3P- и TIP5P-кластеров разница в распределениях потенциальной энергии молекул с ДАА- и ДДА-связями незначительна (рис. 1). В случае SPC- и SPC/E-кластеров распределения потенциальной энергии ДАА- и ДДА-молекул оказались идентичными (рис. 2).

В жидкой фазе все молекулы кластера имеют одинаковые характеристики распределения потенциальной энергии вне зависимости от выбранного потен-

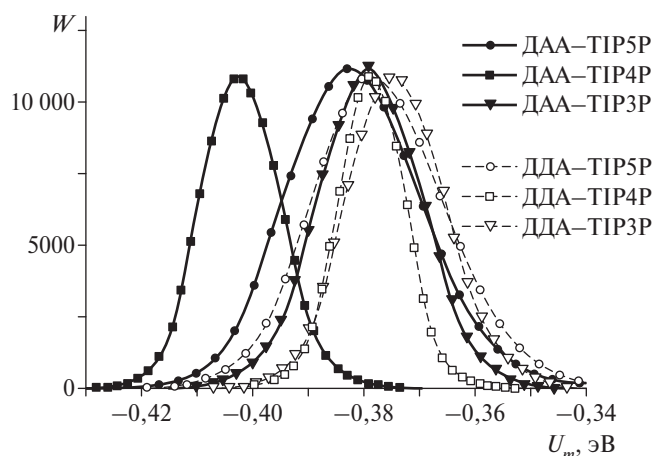


Рис. 1. Твёрдая фаза. Распределение потенциальной энергии (U_m) молекул в кластере с двумя типами водородных связей (ДАА и ДДА) для потенциалов $TIPnP$ ($n = 3-5$).

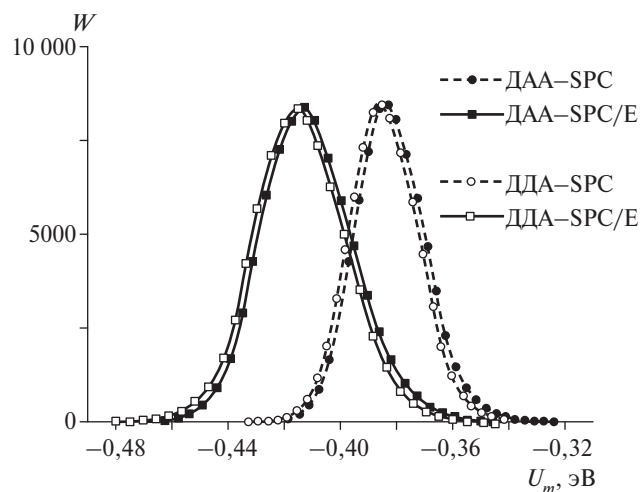


Рис. 2. Твёрдая фаза. Распределение потенциальной энергии (U_m) молекул в кластере с двумя типами водородных связей (ДАА и ДДА) для потенциалов SPC и SPC/E.

циала, что отражено на рис. 3 (для $TIPnP$ -потенциалов) и рис. 4 (для SPC- и SPC/E-потенциалов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическое моделирование динамики частиц в октамере воды позволило получить результаты, которые касаются вопроса выбора потенциала взаимодействия между молекулами. А именно:

1. В твёрдой фазе кластера существенные различия в распределениях потенциальной энергии молекул с ДАА- и ДДА-водородными связями проявляются при использовании $TIP4P$ -потенциала взаимодействия.

2. Использование других потенциалов — $TIP3P$, $TIP5P$, SPC, SPC/E — не позволяет отличить моле-

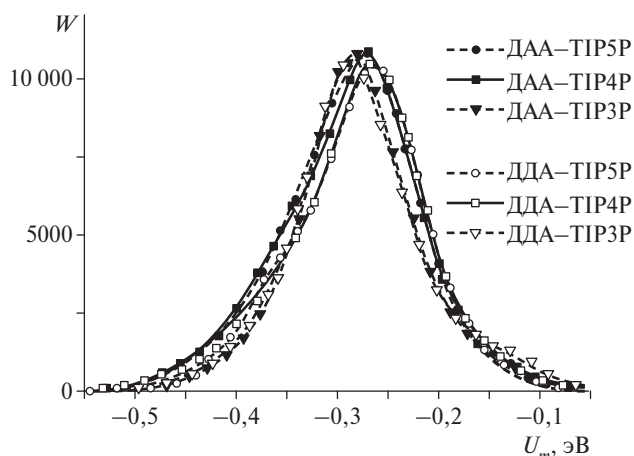


Рис. 3. Жидкая фаза. Распределение потенциальной энергии (U_m) молекул в кластере с двумя типами водородных связей (ДАА и ДДА) для потенциалов $TIPnP$ ($n = 3-5$).

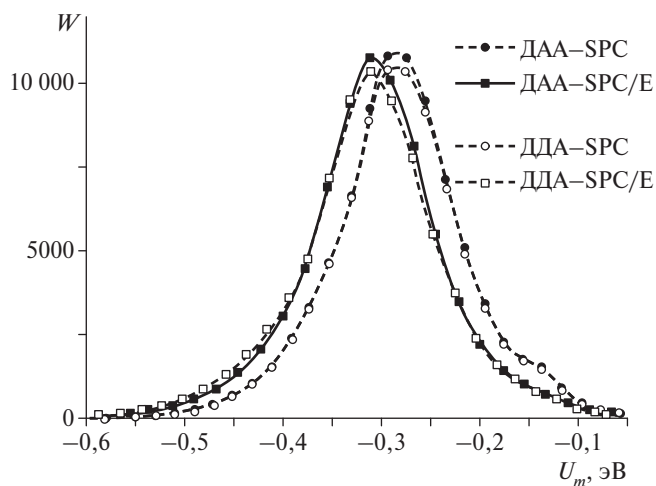


Рис. 4. Жидкая фаза. Распределение потенциальной энергии (U_m) для молекул в кластере с двумя типами водородных связей (ДАА и ДДА) для потенциалов SPC и SPC/E.

кулы с разными типами водородных связей. Этот факт даёт возможность выделить потенциал $TIP4P$ как предпочтительный для изучения динамики кластера в твёрдой фазе на молекулярном уровне.

3. При описании динамики кластера в жидкой фазе могут использоваться все рассмотренные в данной работе аналитические потенциалы, так как кластеры демонстрируют близкие динамические характеристики.

4. Данные результаты позволяют расширить динамический критерий фазы воды, предложенный в работе [4], и использовать распределения потенциальной энергии молекул как критерий выбора потенциала для описания динамических особенностей фазы и фазовых переходов в кластерах воды на молекулярном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ludwig R. // Chem. Int. Ed. 2001. V. 40. P. 1808–1827.
2. Lindemann F.A. // Phys. Z. 1910. V. 11. P. 609–612.
3. Beck T.L., Jellinek J., Berry R.S.J. // Chem. Phys. 1987. V. 87. P. 545–554.
4. Belega E.D., Elyutin P.V., Trubnikov D.N. // Math. Biol. and Bioinform. 2017. V. 12. № 2. P. 487–495.
5. Tsai C.J., Jordan K.D. // J. Chem. Phys. 1991. V. 95. P. 3850–3853.
6. Laria D., Rodrigues J., Dellago C., Chandler D. // J. Phys. Chem. A. 2001. V. 105. P. 2646–2651.
7. Jorgensen W.L., Chandrasekhar J., Madura J.D., et al. // J. Chem. Phys. 1983. V. 79. P. 926–935.
8. Mahoney M.W., Jorgensen W.L. // J. Chem. Phys. 2000. V. 112. P. 8910–8922.
9. Berendsen H.J.C., Postma J.P.M., van Gunsteren W.F., Hermans J. In: Intermolecular Forces. Dordrecht: Reidel, 1981. P. 331.
10. Berendsen H.J.C., Grigera J.R., Straatsma T.P. // J. Phys. Chem. 1987. V. 91. P. 6269–6271.
11. Verlet L. // Phys. Rev. 1967. V. 159. № 1. P. 98–103.
12. Swope W.C., Andersen H.C., Berens P.H., Wilson K.R. // J. Chem. Phys. 1982. V. 76. P. 637.
13. Huller A. // Z. Phys. B. 1994. V. 93. P. 401–405.
14. Belega E.D., Trubnikov D.N., Cheremukhin E.A. // J. Struct. Chem. 2015. V. 56. № 1. P. 52–57.
15. Wales D.J., Ohmine I. // J. Chem. Phys. 1993. V. 98. P. 7245–7256.

MOLECULAR DYNAMICS OF WATER CLUSTERS AND INTERACTION POTENTIALS

E. D. Belega, D. N. Trubnikov

Presented by Academician of the RAS B.N. Chetverushkin September 14, 2018

Received September 24, 2018

The molecular dynamics method was used to analyze the dynamic characteristics of water clusters in the solid and liquid phase. A criterion is proposed for choosing the interaction potential, which is based on the distributions of the potential energy of cluster molecules in different phases. The connection of the obtained distributions with the dynamics and structure of the hydrogen bonds' net of the cluster is shown.

Keywords: molecular dynamics, water clusters, water octamer, phase transitions, criterion of phase, interaction potential.

УДК 517.9

О КЛАССИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ ПЕРВОЙ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ВЛАСОВА—ПУАССОНА В БЕСКОНЕЧНОМ ЦИЛИНДРЕ

Ю. О. Беляева*, А. Л. Скубачевский**

Представлено академиком РАН В. В. Козловым 18.09.2018 г.

Поступило 21.09.2018 г.

Рассматривается первая смешанная задача для системы уравнений Власова—Пуассона в бесконечном цилиндре. Эта задача описывает кинетику заряженных частиц двухкомпонентной высокотемпературной плазмы под действием внешнего магнитного поля. Показано, что для произвольного потенциала электрического поля и для достаточно большого внешнего магнитного поля характеристики уравнений Власова не пересекают границу цилиндра. Доказаны существование и единственность классического решения системы уравнений Власова—Пуассона с носителями плотностей распределения ионов и электронов, лежащими на некотором расстоянии от границы цилиндра.

Ключевые слова: уравнения Власова—Пуассона, смешанная задача, классические решения, внешнее магнитное поле.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846663-666>

Будем рассматривать систему уравнений Власова—Пуассона для двухкомпонентной плазмы в бесконечном цилиндре

$$-\Delta\varphi(x, t) = 4\pi e \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{\beta} \beta f^{\beta}(x, v, t) dv, \quad (1)$$

$$x \in Q, \quad 0 < t < T,$$

$$\frac{\partial f^{\beta}}{\partial t} + (v, \nabla_x f^{\beta}) + \frac{\beta e}{m_{\beta}} \left(-\nabla_x \varphi + \frac{1}{c} [v, B], \nabla_v f^{\beta} \right) = 0, \quad (2)$$

$$x \in Q, \quad v \in \mathbb{R}^3, \quad 0 < t < T, \quad \beta = \pm 1,$$

с начальными условиями

$$f^{\beta}(x, v, t)|_{t=0} = f_0^{\beta}(x, v), \quad x \in \bar{Q}, \quad v \in \mathbb{R}^3, \quad \beta = \pm 1, \quad (3)$$

и краевым условием Дирихле

$$\varphi(x, t) = 0, \quad x \in \partial Q, \quad 0 \leq t < T. \quad (4)$$

Здесь $Q = G \times \mathbb{R}$, $G \subset \mathbb{R}^2$ — ограниченная область с границей $\partial G \in C^{\infty}$, $\partial Q = \partial G \times \mathbb{R}$, $f^{\beta} = f^{\beta}(x, v, t)$ — функция плотности распределения положительно заряженных ионов, если $\beta = +1$, и электронов, если $\beta = -1$, в точке x со скоростью v в момент времени t ; $\varphi = \varphi(x, t)$ — потенциал самосогласованного электрического поля; ∇_x и ∇_v — градиенты по x и v соответственно; m_{+1} и m_{-1} — массы иона и электрона; e — заряд электрона; c — скорость света; B — индукция внешнего магнитного поля; $(\cdot, \cdot)$ — скалярное

произведение в $\mathbb{R}^3$; $[\cdot, \cdot]$ — векторное произведение в $\mathbb{R}^3$.

Смешанные задачи для системы уравнений Власова—Пуассона в областях с границей описывают математическую модель двухкомпонентной плазмы в термоядерном реакторе. В физике и математике уравнениям Власова уделяется значительное внимание (см. [1, 2, 4–12] и имеющуюся там библиографию). Эти уравнения имеют приложения к моделированию кинетики высокотемпературной плазмы, процессу управляемого термоядерного синтеза, астрофизике, а также к таким важным физическим явлениям, как эффект затухания Ландау [7] и др.

Задача Коши и вопросы существования глобальных классических решений для системы уравнений Власова—Пуассона рассматривались в работах [4, 8, 9]. В областях с границей уравнения Власова исследованы значительно меньше. Глобальным классическим решениям в случае полупространства посвящены работы [5, 6]. В общей постановке вопрос о существовании классических решений смешанных задач для системы уравнений Власова—Пуассона является нерешённой проблемой [1].

Смешанные задачи для системы Власова—Пуассона в бесконечном цилиндре и полупространстве исследовались в [10–12].

В случае бесконечного цилиндра уравнения Власова—Пуассона описывают кинетику высокотемпературной плазмы в пробочной ловушке. При попадании частиц плазмы на стенку вакуумной камеры

Российский университет дружбы народов, Москва

*E-mail: yilia-b@yandex.ru

**E-mail: skublector@gmail.com

может произойти либо разрушение реактора, либо остывание плазмы и прекращение реакции. Поэтому важно обеспечить удержание плазменного шнура строго внутри реактора, что достигается с помощью достаточно большого магнитного поля. Математически это можно интерпретировать как исследование решений, носители которых лежат на некотором расстоянии от границы рассматриваемой области.

Данная работа посвящена исследованию разрешимости первой смешанной задачи для системы уравнений Власова—Пуассона в бесконечном цилиндре. Показано, что при достаточно большом магнитном поле характеристики уравнений Власова не пересекают границу рассматриваемой области. Получены новые достаточные условия существования и единственности решений, носители которых лежат строго во внутреннем цилиндре.

Введём некоторые функциональные пространства.

Обозначим через $C^s(\mathbb{R}^n)$ ($C^s(\bar{Q})$), $s \geq 0$, $n \in \mathbb{N}$, пространство Гёльдера функций, непрерывных в $\mathbb{R}^n$ ($\bar{Q}$) и имеющих непрерывные производные в $\mathbb{R}^n$ ($\bar{Q}$) вплоть до k -го порядка, $k = [s]$, с конечной нормой

$$\|u\|_s = \max_{|\alpha| \leq k} \sup_x |\mathcal{D}^\alpha u(x)| \quad \text{для } s = k \in \mathbb{Z}, \quad 0 \leq k,$$

$$\|u\|_s = \|u\|_k + |u|_{k+\sigma} \quad \text{для } s = k + \sigma, \quad 0 \leq k \in \mathbb{Z}, \quad 0 < \sigma < 1,$$

где

$$|u|_{k+\sigma} = \max_{|\alpha|=k} \sup_{x \neq y} |x - y|^{-\sigma} |\mathcal{D}^\alpha u(x) - \mathcal{D}^\alpha u(y)|,$$

$$\mathcal{D}^\alpha = \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \right)^{\alpha_1} \dots \left(\frac{\partial}{\partial x_n} \right)^{\alpha_n},$$

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n), \quad |\alpha| = \alpha_1 + \dots + \alpha_n.$$

Пусть $\dot{C}^k(\mathbb{R}^n)$, $k, n \in \mathbb{N}$, — пространство непрерывно дифференцируемых функций в $\mathbb{R}^n$ с компактными носителями.

Обозначим через $C_0^s(\bar{Q})$, $s \geq 0$, замыкание множества функций из $C^s(\bar{Q})$ с компактными в $\bar{Q}$ носителями.

Будем обозначать $\hat{C}^s(\bar{Q})$ пространство вектор-функций $Y = (Y_1, Y_2, Y_3)$ с координатами $Y_i \in C^s(\bar{Q})$ и нормой

$$\|Y\|_s = \max_{0 \leq m \leq k} \langle Y \rangle_m,$$

$$\langle Y \rangle_m = \left\{ \sum_{i=1}^3 \max_{|\alpha|=m} \|\mathcal{D}^\alpha Y_i\|^2 \right\}^{1/2} \quad \text{для } s = k \in \mathbb{Z}, \quad 0 \leq k,$$

$$\|Y\|_s = \|Y\|_k + \langle Y \rangle_{k+\sigma},$$

$$\langle Y \rangle_{k+\sigma} = \left\{ \sum_{i=1}^3 |Y|_{k+\sigma}^2 \right\}^{1/2} \quad \text{для } s = k + \sigma,$$

$$0 \leq k \in \mathbb{Z}, \quad 0 < \sigma < 1.$$

Введём банахово пространство $C([0, T], C_0^s(\bar{Q}))$, $s > 0$, непрерывных функций $[0, T] \ni t \mapsto \varphi(\cdot, t) \in C_0^s(\bar{Q})$ с нормой

$$\|\varphi\|_{s,T} = \sup_{0 \leq t \leq T} \|\varphi(\cdot, t)\|_s.$$

Рассмотрим также банахово пространство $L_1((0, T), C_0^s(\bar{Q}))$, $s > 0$, измеримых по Лебегу функций $(0, T) \ni t \mapsto \varphi(\cdot, t) \in C_0^s(\bar{Q})$ с нормой

$$\|\varphi\|_{L_1((0, T), C_0^s(\bar{Q}))} = \int_0^T \|\varphi(\cdot, t)\|_s dt.$$

Обозначим

$$M_{s,R} = \left\{ \varphi \in C([0, T], C_0^s(\bar{Q})) : \|\varphi\|_{L_1((0, T), C_0^s(\bar{Q}))} \leq R \right\},$$

$$R > 0, \quad s > 0.$$

Определение 1. Вектор-функцию $\{\varphi, f^\beta\}$, $\varphi \in C([0, T], C_0^{2+\sigma}(\bar{Q}))$, $f^\beta \in C^1(\bar{Q} \times \mathbb{R}^3 \times [0, T])$ мы назовём классическим решением задачи (1)–(4), если $\{\varphi, f^\beta\}$ удовлетворяет уравнениям (1), (2), начальным условиям (3) и краевому условию (4).

Пусть $B_r(x^0) = \{x \in \mathbb{R}^3 : |x - x^0| < r\}$, $B_r = B_r(0)$, $|B_r| = \frac{4\pi r^3}{3}$ и $G_\delta = \{x' \in G : \text{dist}(x', \partial G) > \delta\}$, $Q_\delta = \{x \in Q : \text{dist}(x, \partial Q) > \delta\}$, где $\delta > 0$, $x' = (x_1, x_2)$. Предположим, что $G_{2\delta} \neq \emptyset$.

Обозначим $\mathcal{D}_0 = (Q_{\delta_0} \cap B_{\kappa_0}) \times B_{\rho_0}$, где $\delta_0, \kappa_0, \rho_0 > 0$ таковы, что $\frac{3\delta}{2} < \delta_0 < \kappa_0 < \kappa - \frac{\delta}{8}$, $\rho_0 < \rho$, $Q_{\delta_0} \cap B_{\kappa_0} \neq \emptyset$.

Сформулируем теперь условия, которым должны удовлетворять магнитное поле B и начальные плотности распределения $f_0^\beta(x, v)$.

Условие 1. Пусть $B \in \hat{C}^{1+\sigma}(\bar{Q})$ и пусть $B(x) = (0, 0, h)$ для $x \in \bar{Q}_{\delta/4}$, где

$$\frac{16c}{e\delta} \left(\rho + \frac{\sqrt{3}eR}{m_{-1}} \right) < h,$$

$\delta, \rho, R, h > 0$ не зависят от x .

Условие 2. Пусть $f_0^\beta \in \dot{C}^{1+\sigma}(\mathbb{R}^6)$ и пусть $\text{supp } f_0^\beta \subset \mathcal{D}_0$.

Пусть $\varphi \in M_{2+\sigma,R}$ — заданная функция, тогда уравнение (2) с начальным условием (3) можно решить, используя метод характеристик. Для этого рассмотрим систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dX_\varphi^\beta}{d\tau} = V_\varphi^\beta, \quad 0 < \tau < T, \quad \beta = \pm 1, \quad (5)$$

$$\frac{dV_\varphi^\beta}{d\tau} = -\frac{\beta e}{m_\beta} \nabla_x \varphi(X_\varphi^\beta, \tau) + \frac{\beta e}{m_\beta c} [V_\varphi^\beta, B(X_\varphi^\beta)], \quad 0 < \tau < T, \quad \beta = \pm 1, \quad (6)$$

с начальными условиями

$$X_\varphi^\beta|_{\tau=0} = x, \quad \beta = \pm 1, \quad (7)$$

$$V_\varphi^\beta|_{\tau=0} = v, \quad \beta = \pm 1, \quad (8)$$

где $x \in Q, v \in \mathbb{R}^3$.

Лемма 1. Пусть выполняется условие 1. Тогда для любых $\varphi \in M_{2+\sigma,R}$, $x \in Q_{7\delta/8}$ и $v \in B_\rho$ существует единственное решение $(X_\varphi^\beta(x, v, \tau), V_\varphi^\beta(x, v, \tau))$ задачи (5)–(8) на полуинтервале $[0, T)$, при этом $X_\varphi^\beta(x, v, \tau) \in Q_{3\delta/4}$, $V_\varphi^\beta(x, v, \tau) \in B_{\rho_1}$ для всех $\tau \in [0, T)$, где $\rho_1 = \rho + \frac{\sqrt{3eR}}{m_{-1}}$.

В частности, это утверждение справедливо в случае $T = \infty$.

Рассмотрим теперь систему дифференциальных уравнений (5), (6) на интервале $(0, t)$, $0 < t \leq T$, с начальными условиями

$$X_\varphi^\beta|_{\tau=t} = y, \quad \beta = \pm 1, \quad (9)$$

$$V_\varphi^\beta|_{\tau=t} = q, \quad \beta = \pm 1. \quad (10)$$

Лемма 2. Пусть выполняется условие 1. Тогда для любых $\varphi \in M_{2+\sigma,R}$, $y \in Q_{7\delta/8}$, $q \in B_{\rho_1}$ и $0 < t \leq T$ существует единственное решение $(X_\varphi^\beta(y, q, t, \tau), V_\varphi^\beta(y, q, t, \tau))$ задачи (5), (6), (9), (10) на полуинтервале $(0, t]$, при этом $X_\varphi^\beta(y, q, t, \tau) \in Q_{3\delta/4}$ и $V_\varphi^\beta(y, q, t, \tau) \in B_{\rho_2}$, где $\rho_2 = \rho_1 + \frac{\sqrt{3eR}}{m_{-1}}$.

Обозначим $\Omega_0 = (Q_{3\delta/4} \cap B_{\kappa_1}) \times B_{\rho_1}$, $\mathcal{D}_0^1 = (Q_{7\delta/8} \cap B_{\kappa_1-\delta/8}) \times B_{\rho_1}$, где $\kappa_1 = \kappa + T\rho_1$.

Продолжая функции $X_\varphi^\beta(y, q, t, \tau), V_\varphi^\beta(y, q, t, \tau)$ по непрерывности в $\tau = 0$, мы будем полагать $\hat{X}_\varphi^\beta(y, q, t) = X_\varphi^\beta(y, q, t, 0)$, $\hat{V}_\varphi^\beta(y, q, t) = V_\varphi^\beta(y, q, t, 0)$.

Для произвольно заданного $0 < t \leq T$ рассмотрим отображение

$$\hat{S}_{\varphi,t}^\beta(y, q): \Omega_0 \rightarrow \Omega_{\varphi,t}^\beta = \{(x, v): (x, v) = \hat{S}_{\varphi,t}^\beta(y, q), (y, q) \in \Omega_0\},$$

заданное по формуле

$$\hat{S}_{\varphi,t}^\beta(y, q) = (\hat{X}_\varphi^\beta(y, q, t), \hat{V}_\varphi^\beta(y, q, t)).$$

Очевидно, для любого $0 \leq t < T$ отображение $S_{\varphi,t}^\beta: \Omega_{\varphi,t}^\beta \rightarrow \Omega_0$, заданное по формуле

$$S_{\varphi,t}^\beta(x, v) = (X_\varphi^\beta(x, v, t), V_\varphi^\beta(x, v, t)),$$

является обратным к $\hat{S}_{\varphi,t}^\beta$, т.е.

$$\hat{S}_{\varphi,t}^\beta(S_{\varphi,t}^\beta(x, v)) = (x, v), \quad (x, v) \in \Omega_{\varphi,t}^\beta.$$

Лемма 3. Пусть выполняются условия 1, 2. Тогда для любых $\varphi \in M_{2+\sigma,R}$ и $0 < t \leq T$ мы имеем $\text{supp } f_0^\beta(\hat{S}_{\varphi,t}^\beta(x, v)) \subset \mathcal{D}_0^1$.

Определим функцию $f_\varphi^\beta(x, v, t)$ по формуле

$$f_\varphi^\beta(x, v, t) = \begin{cases} f_0^\beta(S_{\varphi,t}^\beta(x, v)), & (x, v) \in \mathcal{D}_0^1, 0 \leq t \leq T, \\ 0, & (x, v) \in (Q \times \mathbb{R}^3) \setminus \mathcal{D}_0^1, 0 \leq t \leq T, \end{cases}$$

где $\varphi \in M_{2+\sigma,R}$.

Обозначим

$$F_\varphi(x, t) = \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{\beta=\pm 1} \beta f_\varphi^\beta(x, v, t) dv, \quad x \in \bar{Q}, \quad 0 \leq t \leq T.$$

Положим $m_s = \max_{\beta} \|f_0^\beta\|_s, \quad s \geq 0$.

Лемма 4. Пусть выполняются условия 1, 2. Тогда для любой $\varphi \in M_{2+\sigma,R}$ мы имеем $F_\varphi \in C([0, T], C_0^\sigma(\bar{Q}))$, при этом

$$\|F_\varphi\|_{L_1((0,T), C_0^\sigma(\bar{Q}))} \leq c_1 m_\sigma,$$

где $c_1 = 2|B_{\rho_1}|(1 + 3^{\sigma/2} c_0^\sigma)T$,

$$c_0 = \exp \left(\max \left\{ \frac{3eR}{m_{-1}} + \frac{\sqrt{3e}\rho_2}{cm_{-1}} \langle B \rangle_1 T, T \right\} \right).$$

Рассмотрим вспомогательную задачу для уравнения Пуассона с условием Дирихле в бесконечном цилиндре:

$$-\Delta u(x) = f(x), \quad x \in Q, \quad (11)$$

$$u(x) = 0, \quad x \in \partial Q. \quad (12)$$

Из теоремы 6.3 в [3] вытекает следующее утверждение.

Лемма 5. Для любой функции $f \in C_0^\sigma(\bar{Q})$ существует единственное решение задачи (11), (12) $u \in C_0^{2+\sigma}(\bar{Q})$ и

$$\|u\|_{C^{2+\sigma}(\bar{Q})} \leq c_2 \|f\|_{C^\sigma(\bar{Q})},$$

где $c_2 > 0$ не зависит от f .

Основным результатом данного сообщения является следующая

Теорема 1. Пусть выполняются условия 1 и 2. Предположим также, что выполняется следующее неравенство:

$$4\pi e c_1 c_2 m_\sigma < R,$$

где $c_1, c_2 > 0$ — константы из лемм 4, 5.

Тогда существует единственное классическое решение задачи (1)–(4) такое, что $\varphi \in M_{2+\sigma, R}$ и $\text{supp } f^\beta(\cdot, \cdot, t) \subset D_0^1$ для всех $t \in [0, T]$.

Благодарности. Авторы глубоко благодарны академику РАН В.В. Козлову за внимание к работе и ценные советы.

Источники финансирования. Работа подготовлена при поддержке Программы РУДН “5-100” и гранта РФФИ 17-01-00401.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.В. Обобщенное кинетическое уравнение Власова // УМН. 2008. Т. 63. № 4 (382). С. 93–130.
2. Маслов В.П. Уравнения самосогласованного поля, Итоги науки и техники. Сер. Соврем. пробл. математики. М.: ВИНТИ, 1978. В. 11. С. 153–234.
3. Назаров С.А., Пламеневский Б.А. Эллиптические задачи в областях с кусочно-гладкой границей. М.: Наука, 1991.
4. Batt J. Global Symmetric Solutions of the Initial Value Problem of Stellar Dynamics // J. Different. Equat. 1977. V. 25. № 3. P. 342–364.
5. Guo Y. Regularity for the Vlasov Equations in a Half Space // Indiana Univ. Math. J. 1994. V. 43. № 1. P. 255–320.
6. Hwang H.J., Velázquez J.J.L. On Global Existence for the Vlasov–Poisson System in a Half Space // J. Different. Equat. 2009. V. 247. № 6. P. 1915–1948.
7. Mouhot C., Villani C. On Landau Damping // Acta Math. 2011. V. 207. № 1. P. 29–201.
8. Pfaffelmoser K. Global Classical Solutions of the Vlasov–Poisson System in Three Dimensions for General Initial Data // J. Different. Equat. 1992. V. 95. № 2. P. 281–303.
9. Schäffer J. Global Existence of Smooth Solutions to the Vlasov–Poisson System in Three Dimensions // Commun. Partial Different. Equat. 1991. V. 16. № 8/9. P. 1313–1335.
10. Скубачевский А.Л. Смешанные задачи для уравнений Власова–Пуассона в полупространстве, Теория функций и уравнения математической физики. Сб. статей. К 90-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Льва Дмитриевича Кудрявцева // Тр. Мат. ин-та РАН. 2013. Т. 283. С. 204–232.
11. Скубачевский А.Л. Уравнения Власова–Пуассона для двухкомпонентной плазмы в однородном магнитном поле // 2014. УМН. Т. 69. № 2. С. 107–148.
12. Скубачевский А.Л., Tsuzuki Y. Классические решения уравнений Власова–Пуассона с внешним магнитным полем в полупространстве // ЖВМиМФ. 2017. Т. 57. № 3. С. 536–552.

ON CLASSICAL SOLUTIONS TO THE FIRST MIXED PROBLEM FOR THE VLASOV–POISSON SYSTEM IN AN INFINITE CYLINDER

Yu. O. Belyaeva, A. L. Skubachevskii

Presented by Academician of the RAS V.V. Kozlov September 18, 2018

Received September 21, 2018

The first mixed problem for the Vlasov–Poisson system in an infinite cylinder is considered. This problem describes the kinetics of charged particles in a high-temperature two-component plasma under an external magnetic field. For an arbitrary electric field potential and a sufficiently strong external magnetic field, it is shown that the characteristics of the Vlasov equations do not reach the boundary of the cylinder. It is proved that the Vlasov–Poisson system with ion and electron distribution density functions supported at some distance from the cylinder boundary has a unique classical solution.

Keywords: Vlasov–Poisson equations, mixed problem, classical solutions, external magnetic field.

УДК 519.853.62

О ДОСТИЖИМОСТИ ОПТИМАЛЬНЫХ ОЦЕНОК СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ВЫПУКЛОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ

А. В. Гасников^{1,2,*}, Э. А. Горбунов¹, Д. А. Ковалев¹,
А. А. М. Мохаммед¹, Е. О. Черноусова¹

Представлено академиком РАН К. В. Рудаковым 05.09.2018 г.

Поступило 27.09.2018 г.

Рассматривается проксимальный быстрый градиентный метод Монтейро—Свайтера (2013 г.), в котором используется один шаг метода Ньютона для приближённого решения вспомогательной задачи на каждой итерации проксимального метода. Метод Монтейро—Свайтера является оптимальным (по числу вычислений градиента и гессиана оптимизируемой функции) для достаточно гладких задач выпуклой оптимизации в классе методов, использующих только градиент и гессиан оптимизируемой функции. За счёт замены шага метода Ньютона на шаг недавно предложенного тензорного метода Ю. Е. Нестерова (2018 г.), а также за счёт специального обобщения условия подбора шага в проксимальном внешнем быстром градиентном методе удалось предложить оптимальный тензорный метод, использующий старшие производные. В частности, такой тензорный метод, использующий производные до третьего порядка включительно, оказался достаточно практичным ввиду сложности итерации, сопоставимой со сложностью итерации метода Ньютона. Таким образом, получено конструктивное решение задачи, поставленной Ю. Е. Нестеровым в 2018 г., об устранении зазора в точных нижних и завышенных верхних оценках скорости сходимости для имеющихся на данный момент тензорных методов порядка $p \geq 3$.

Ключевые слова: проксимальный ускоренный метод, тензорный метод, метод Ньютона, нижние оценки.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846667-671>

В работе рассматривается задача выпуклой безусловной оптимизации

$$f(x) \rightarrow \min_{x \in \mathbb{R}^n}, \quad (1)$$

где функция f имеет непрерывные частные производные порядка $p \geq 3$. Предположим, что тензоры частных производных $\nabla^r f(x) = \left\{ \frac{\partial \nabla^{r-1} f(x)}{\partial x} \right\}_{i=1}^n$

(в частности, при $r = 2$ получаем, что $\nabla^r f(x) = \nabla^2 f(x)$ — это матрица Гессе функции f в точке x) удовлетворяют условию Липшица с соответствующими константами M_r , т.е.

$$\|\nabla^r f(x) - \nabla^r f(y)\|_2 \leq M_r \|x - y\|_2 \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^n, \quad (2)$$

где $\|\cdot\|_2$ — стандартная евклидова норма в $\mathbb{R}^n$. Условие $x, y \in \mathbb{R}^n$ можно заменить условием $x, y \in \{z \in \mathbb{R}^n \mid f(x) \leq f(x^0)\}$, где x^0 — стартовая точка.

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

² Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича Российской Академии наук, Москва

*E-mail: gasnikov@yandex.ru

ка. Кроме того, отметим, что на $\nabla^r f(x)[\cdot]$ — это симметричная r -линейная форма и её норма определяется стандартным образом:

$$\|\nabla^r f(x)\|_2 \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{h_1, \dots, h_n} \{\nabla^r f(x)[h_1, \dots, h_n] \mid \|h_i\|_2 \leq 1, i = 1, 2, \dots, n\}.$$

В частности,

$$\begin{aligned} \|\nabla f(x)\|_2 &= \sup_{\|y\|_2 \leq 1} \langle \nabla f(x), y \rangle, \\ \|\nabla^2 f(x)\|_2 &= \sup_{\|y\|_2 \leq 1} \sup_{\|z\|_2 \leq 1} \langle \nabla^2 f(x)y, z \rangle. \end{aligned}$$

Для класса методов, у которых на каждой итерации разрешается не более чем $O(1)$ раз обращаться к орaku (подпрограмме) за значениями $\nabla^r f(x)$, $r \leq p$, $p \geq 2$, оценка числа итераций, необходимых для достижения ε -точности по функции, будет иметь вид

$$O \left(\min \left\{ n \ln \left(\frac{\Delta f}{\varepsilon} \right), \frac{M_0^2 R^2}{\varepsilon^2}, \left(\frac{M_1 R^2}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}}, \dots, \left(\frac{M_p R^{p+1}}{\varepsilon} \right)^{\frac{2}{3p+1}} \right\} \right), \quad (3)$$

где $R = \|x_0 - x_*\|_2$ — расстояние от точки старта до её проекции на множество решений задачи (1).

Гипотеза 1 (см. [1–3]). Существует такой алгоритм, использующий только информацию о $\nabla^r f(x)$, $r \leq p$, который сходится согласно оценке (3).

Для случая $p = 2$ такой алгоритм был построен в работе [2]. Ниже построены такие алгоритмы и для случая $p \geq 2$.

Заметим, что в общем случае оценка (3) не может быть улучшена, даже если дополнительно известно, что $M_{p+1} < \infty$ и $M_{p+2} < \infty$ (см. [1, 4]).

Следуя работе Ю.Е. Нестерова [2], введём оператор

$$T_{p,M}^F(x) \in \operatorname{Argmin}_{y \in \mathbb{R}^n} \left\{ \sum_{r=0}^p \frac{1}{r!} \nabla^r F(x) [\underbrace{y-x, \dots, y-x}_r] + \frac{M}{(p+1)!} \|y-x\|_2^{p+1} \right\}. \quad (4)$$

Утверждение 1.

1) (см. Theorem 1 из [2]). Задача (4) при $M \geq pM_p$ является задачей выпуклой оптимизации.

2) (см. Lemma 1 из [2]). Для всех $x \in \mathbb{R}^n$ имеет место неравенство

$$\|\nabla F(T_{p,M}^F(x))\|_2 \leq \frac{M + M_p}{p!} \|T_{p,M}^F(x) - x\|_2^p.$$

В частности, при $M = pM_p$

$$\|\nabla F(T_{p,pM_p}^F(x))\|_2 \leq \frac{(1+p)M_p}{p!} \|T_{p,pM_p}^F(x) - x\|_2^p.$$

Сначала в общих чертах опишем идею предлагаемого подхода. Следуя работе Р. Монтейро и Б. Свайтера [5], введём семейство функций ($L \geq 0$ — параметр)

$$F_{L,\tilde{x}}(x) = f(x) + \frac{L}{2} \|x - \tilde{x}\|_2^2.$$

По функции $F_{L,\tilde{x}}(x)$ определим функцию

$$\tilde{f}_L(x) = \min_{y \in \mathbb{R}^n} F_{L,x}(y) = F_{L,x}(y_L(x)). \quad (5)$$

Для любого $L \geq 0$ имеет место неравенство

$$\tilde{f}_L(x) \leq f(x),$$

причём функция $\tilde{f}_L(x)$ является выпуклой и имеет L -липшицев градиент. Кроме того,

$$x_* \in \operatorname{Argmin}_{x \in \mathbb{R}^n} \tilde{f}_L(x) \Rightarrow x_* \in \operatorname{Argmin}_{x \in \mathbb{R}^n} f(x), \\ \tilde{f}_L(x_*) = f(x_*).$$

Таким образом, вместо исходной задачи можно решать (сглаженную по Моро) задачу

$$\tilde{f}_L(x) \rightarrow \min_{x \in \mathbb{R}^n}. \quad (6)$$

Заметим, что

$$\nabla \tilde{f}_L(x) = -L(y_L(x) - x).$$

На задачу (6) можно смотреть как на обычную задачу гладкой выпуклой оптимизации. Согласно (3) для $p = 1$ сложность решения задачи (6) (число вычислений градиента $\nabla \tilde{f}_L(x)$, т.е. число решений вспомогательных задач вида (5)) быстрым градиентным методом [5–7] можно оценить следующим образом:

$$O\left(\sqrt{\frac{LR^2}{\varepsilon}}\right). \quad (7)$$

Чем меньше выбирается параметр L , тем оценка (7) будет лучше, но при этом тем сложнее на каждой итерации решать вспомогательную подзадачу (5), чтобы посчитать градиент $\nabla \tilde{f}_L(x)$ с нужной точностью. Идея подхода, восходящего к работе [5] при $p \geq 2$, состоит в следующем:

1) вместо задачи (6) с фиксированным L рассмотреть параметрическое семейство задач (6) со специальным образом убывающей (на внешних итерациях) последовательностью $\{L_k\}$. Все эти задачи имеют одинаковый минимум x_* , который необходимо найти. На k -й (внешней) итерации быстрого градиентного метода используется $\nabla \tilde{f}_{L_k}(x)$;

2) при этом считать точно $\nabla \tilde{f}_{L_k}(x)$ нет возможности, поэтому для решения задачи (5) используется всего одна итерация оператора (4) $T_{p,pM_p}^{F_{L_k,x}}(x)$.

Здесь и везде в дальнейшем

$$T_{p,pM_p}^{F_{L,x}}(x) = \arg \min_{y \in \mathbb{R}^n} \left\{ \sum_{r=0}^p \frac{1}{r!} [\nabla_z^r F_{L,x}(z)]_{z=x} \times \right. \\ \left. \times [\underbrace{y-x, \dots, y-x}_r] + \frac{pM_p}{(p+1)!} \|y-x\|_2^{p+1} \right\}.$$

В работе [5] (см. Proposition 5.2) было показано, что если вместо точного решения $y_L(x)$ задачи (5), для которого $\|\nabla F_{L,x}(y_L(x))\|_2 = 0$, на каждой внешней итерации удаётся найти только такое решение $\tilde{y}_L(x)$, что

$$\|\nabla F_{L,x}(\tilde{y}_L(x))\|_2 \leq \frac{L}{2} \|\tilde{y}_L(x) - x\|_2, \quad (8)$$

то быстрый градиентный метод для задачи (6) (с постоянным на итерациях L) будет также сходиться согласно оценке (7), несмотря на неточность решения вспомогательных задач на каждой итерации (5).

Оценка (8) соответствует концепции относительной точности решения вспомогательной задачи в популярном сейчас способе ускорения неускоренных методов Catalyst [8]. Также в работе [5] (см. Theorem 4.1) было показано при $p = 2$, что если дополнительно с выполнением условия (8)

$$\|\nabla F_{L_k, x^k}(\tilde{y}_{L_k}(x^k))\|_2 \leq \frac{L_k}{2} \|\tilde{y}_{L_k}(x^k) - x^k\|_2, \quad (9)$$

удётся (за счёт специального подбора L_k на каждой итерации) ещё и обеспечить выполнение условия

$$\frac{2(p+1)M_p}{p!L_k} \|\tilde{y}_{L_k}(x^k) - x^k\|_2^{p-1} \geq \frac{1}{2}, \quad (10)$$

то число внешних итераций такого метода (число решений вспомогательных подзадач (5)) будет определяться оценкой (3)

$$O\left(\left(\frac{M_p R^{p+1}}{\varepsilon}\right)^{\frac{2}{3p+1}}\right),$$

что существенно улучшает оценку (7) при $p \geq 2$.

Константа $\frac{1}{2}$ в правой части неравенства (9) выбрана для определённости; важно только, чтобы это было число, строго меньшее 1. Проблема, однако, в том, как обеспечить одновременное выполнение условий (8) и (9). Оказывается, если выбирать

$$\tilde{y}_{L_k}(x^k) = T_{p, pM_p}^{F_{L_k, x^k}}(x^k),$$

то согласно утверждению 1

$$\left\| \nabla F\left(T_{p, pM_p}^{F_{L_k, x^k}}(x^k)\right) \right\|_2 \leq \frac{(1+p)M_p}{p!L_k} \|\tilde{y}_{L_k}(x^k) - x^k\|_2^p.$$

Следовательно, если

$$\frac{2(1+p)M_p}{p!L_k} \|\tilde{y}_{L_k}(x^k) - x^k\|_2^{p-1} \leq 1,$$

то условие (8) будет выполнено. Ввиду непрерывной зависимости $\tilde{y}_{L_k}(x^k)$ от L^k и достаточно очевидного факта, состоящего в том, что при $x^k \neq x^*$ найдётся такое, вообще говоря, достаточно маленькое значение $\hat{L}_k > 0$, что

$$\frac{2(1+p)M_p}{p!\hat{L}_k} \|\tilde{y}_{\hat{L}_k}(x^k) - x^k\|_2^{p-1} \geq 1,$$

и достаточно большое значение $\bar{L}_k > 0$, что

$$\frac{2(1+p)M_p}{p!\bar{L}_k} \|\tilde{y}_{\bar{L}_k}(x^k) - x^k\|_2^{p-1} \leq \frac{1}{2},$$

имеем, что подобрать L_k можно с помощью процедуры одномерного поиска [5]. В типичных ситуациях можно ожидать, что число вызовов оператора (4) $T_{p, pM_p}^{F_{L_k, x^k}}(x^k)$ на одной итерации внешнего метода (быстрого градиентного метода) будет $O(1)$. При этом каждый вызов такого оператора порождает свою выпуклую задачу. Сложность решения такой задачи (т.е. вычисление (4)) с нужной точностью сопоставима при $p = 2, 3$ по объёму вычислений со сложностью итерации метода Ньютона, т.е. оценивается как $\tilde{O}(n^{2,37})$ [2, 9–11] ($\tilde{O}(\cdot) = O(\cdot)$ с точностью до логарифмических множителей).

Приведём теперь сам алгоритм (метод Монтейро—Свайтера—Нестерова порядка $p \geq 2$; см. алгоритм 1) и основную теорему данной работы о скорости сходимости предложенного алгоритма.

Теорема 1 (см. Theorem 6.4 из [5] для $p = 2$). Методу Монтейро—Свайтера—Нестерова порядка $p \geq 2$ (алгоритм 1) для обеспечения условия

$$f(y^N) - f(x_*) \leq \varepsilon$$

достаточно сделать

$$O\left(\left(\frac{M_p R^{p+1}}{\varepsilon}\right)^{\frac{2}{3p+1}}\right)$$

итераций. На каждой итерации в среднем $O(1)$ раз необходимо решать задачу выпуклой оптимизации вида

$$\sum_{r=0}^p \frac{1}{r!} [\nabla_z^r F_{L, x}(z)]_{z=x} [\underbrace{y-x, \dots, y-x}_r] + \frac{pM_p}{(p+1)!} \|y-x\|_2^{p+1} \rightarrow \min_{y \in \mathbb{R}},$$

где

$$F_{L, x}(z) = f(z) + \frac{L}{2} \|z-x\|_2^2.$$

Таким образом, сложность каждой итерации при $p = 2, 3$ составляет $\tilde{O}(n^{2,37})$.

Алгоритм 1. Метод Монтейро—Свайтера—Нестерова.

Вход: u_0, y_0 — стартовые точки; N — число итераций; $A_0 = 0$

Выход: y^N

1: **for** $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

2: Выбрать L_k так, чтобы выполнялось условие (условие Монтейро—Свайтера [5] при $p = 2$)

$$\frac{1}{2} \leq \frac{2(p+1)M_p}{p!L_k} \|y^{k+1} - x^k\|_2^{p-1} \leq 1$$

для

$$a_{k+1} = \frac{1}{L_k} + \sqrt{\frac{1}{L_k^2} + 4 \frac{A_k}{L_k}}, \quad A_{k+1} = A_k + a_{k+1},$$

// отметим, что $L_k a_k^2 = A_k$

$$x^k = \frac{A_k}{A_{k+1}} y^k + \frac{a_{k+1}}{A_{k+1}} u^k,$$

$$y^{k+1} = \tilde{y}_{L_k}(x^k) = T_{p, pM_p}^{F_{L_k, x^k}}(x^k)$$

// тензорный шаг Ю.Е. Нестерова [2]

$$3: u^{k+1} = u^k - a_{k+1} \nabla f(y^{k+1})$$

4: end for

5: return y^N

Основным вкладом данной работы является:

1) замена шага метода Ньютона на обобщённый метод Ньютона—Нестерова с регуляризацией;

2) обобщение условия Монтейро—Свайтера на случай $p \geq 2$.

Сочетание этих двух пунктов позволило предложить методы (для разных $p \geq 2$), закрывающие зазор (несовпадение нижних оценок скорости сходимости с верхними оценками для наилучших известных методов), который оставался в оценках скорости сходимости методов высоких порядков при $p \geq 3$. Более того, ввиду главы 5 из [2] в случае $p = 3$ можно ожидать, что предложенный выше алгоритм Монтейро—Свайтера—Нестерова, названный в честь учёных, на идеях которых он был построен, будет эффективным на практике для задач умеренной размерности $n \sim 10^3$.

Источники финансирования. Работа А.В. Гасникова поддержана грантом РФФИ 18–29–03071_мк, работа Э.А. Горбунова поддержана грантом Президента РФ МД-1320.2018.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arjevani Y., Shamir O., Shiff R. Oracle Complexity of Second-Order Methods for Smooth Convex Optimization // Math. Programming. 2017. P. 1–34.
2. Nesterov Yu. Implementable Tensor Methods in Unconstrained Convex Optimization. Prepr. Univ. catholique de Louvain; Center for Operations Res. and Econometrics (CORE). 2018. № 2018005.
3. Гасников А.В., Ковалев Д.А. Гипотеза об оптимальных оценках скорости сходимости численных методов выпуклой оптимизации высоких порядков // Компьют. исслед. и моделирование. 2018. Т. 10. № 3. С. 305–314.
4. Нестеровский А.С., Юдин Д.Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизации. М.: Наука, 1979.
5. Monteiro R., Svaiter B. An Accelerated Hybrid Proximal Extragradient Method for Convex Optimization and its Implications to Second-Order Methods // SIAM J. Optim. 2013. V. 23. № 2. P. 1092–1125.
6. Nesterov Yu. Introductory Lectures on Convex Optimization: A Basic Course. B.: Springer Science & Business Media, 2013. 87 p.
7. Нестеров Ю.Е. Введение в выпуклую оптимизацию. М.: МЦНМО, 2010.
8. Lin H., Mairal J., Harchaoui Z. Catalyst Acceleration for First-Order Convex Optimization: from Theory to Practice // J. Machine Learning Res. 2018. V. 18. № 212. С. 1–54.
9. Nesterov Yu., Polyak B. Cubic Regularization of Newton Method and Its Global Performance // Math. Program. 2006. V. 108. № 1. P. 177–205.
10. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска. М.: МФТИ, 2018. 166 с.
11. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы. Построение и анализ. М.: Изд. дом “Вильямс”, 2009.

REACHABILITY OF OPTIMAL CONVERGENCE RATE ESTIMATES FOR HIGH-ORDER NUMERICAL CONVEX OPTIMIZATION METHODS

A. V. Gasnikov, E. A. Gorbunov, D. A. Kovalev, A. A. M. Mokhammed, E. A. Chernousova

Presented by Academician of the RAS K.V. Rudakov September 5, 2018

Received September 27, 2018

The Monteiro–Svaiter accelerated hybrid proximal extragradient method (2013) with one step of Newton’s method used at every iteration for the approximate solution of an auxiliary problem is considered. The Monteiro–Svaiter method is optimal (with respect to the number of gradient and Hessian evaluations for the optimized function) for sufficiently smooth convex optimization problems in the class of methods using only the gradient and Hessian of the optimized function. An optimal tensor method involving higher derivatives is proposed by replacing Newton’s step with a step of Yu.E. Nesterov’s recently proposed tensor method (2018) and by using a special generalization of the step size selection condition in the outer accelerated proximal extragradient method. This tensor method with derivatives up to the third order inclusive is found fairly practical, since the complexity of its iteration is comparable with that of Newton’s one. Thus, a constructive solution is obtained for Nesterov’s problem (2018) of closing the gap between tight lower and overstated upper bounds for the convergence rate of existing tensor methods of order $p \geq 3$.

Keywords: accelerated proximal method, tensor method, Newton method, lower bounds.

УДК 51-7

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЁХМЕРНЫХ СЦЕН НА ОСНОВЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ВАРИАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ РЕГИСТРАЦИИ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ДАННЫХ

А. В. Вохминцев^{1,2,*}, А. В. Мельников^{1,2,**},
К. В. Миронов^{3,4,***}, В. В. Бурлуцкий^{2,****}

Представлено академиком РАН Ю.С. Попковым 15.06.2018 г.

Поступило 19.09.2018 г.

Предлагается точное решение задачи минимизации функционала, состоящего из двух слагаемых, которые измеряют средние квадраты расстояний для визуально-связанных характерных точек на изображении и средние квадраты расстояний для облаков точек на основе метрики точка—плоскость. В работе описывается точный метод реконструкции трёхмерного динамического окружающего пространства и свойства точных решений. Предлагаемый подход позволяет улучшить точность и сходимость методов реконструкции для сложных и крупномасштабных сцен.

Ключевые слова: трёхмерная реконструкция, итеративный алгоритм ближайших точек, алгоритм сопоставления изображений, системы одновременной навигации и построения карты.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846672-677>

Автоматическая трёхмерная реконструкция сцен окружающего мира является одной из задач технического зрения современных роботизированных систем. Существующие алгоритмы для решения рассматриваемой задачи можно разбить на две группы [1–4]. Алгоритмы первой группы строятся на основе классического итеративного алгоритма ближайших точек (Iterative Close Point, ICP) [2], используют инкрементальный подход к вычислению разреженной трёхмерной модели сцены и метод связок для уточнения параметров камеры и координат трёхмерных точек [5]. Недостатком подхода является необходимость пользовательского ввода данных для вычисления начальной оценки на этапе начального сопоставления. Методы второй группы основаны на сопоставлении в двумерном пространстве дескрипторов особых точек [3, 4]. Недостатками второй группы алгоритмов являются высокая алгоритмическая сложность и предположение о наличии достаточного числа общих особых точек на изобра-

жениях соседних кадров. Ключевым этапом алгоритма ICP является поиск ортогонального или аффинного преобразования, наилучшим образом, в смысле квадратичной метрики, совмещающего два облака точек с заданным соответствием между точками (вариационная подзадача ICP) [6, 7]. Задача точка—точка может решаться с применением итерационного алгоритма Левенберга—Марквардта. Данному алгоритму свойственны типичные недостатки итерационных методов: зависимость точности результата от выбора начального приближения. В работе [8] предложено обобщение алгоритма ICP для использования масштабирования по трём осям помимо поворота и параллельного переноса. В работе [9] приведено решение в замкнутой форме задачи точка—точка в классе аффинных преобразований, позволяющее найти оптимальное преобразование для случаев, когда облако точек является вырожденным. Для класса ортогональных преобразований решение задачи точка—точка в замкнутой форме получено с помощью кватернионов [6] или с помощью ортогональных матриц [7]. На основе метода Хорна сформулирован алгоритм ICP в варианте точка—плоскость [10]. Известно, что метрика точка—плоскость превосходит метрику точка—точка с точки зрения точности и скорости сходимости. Для вариационной задачи точка—плоскость в классе аффинных преобразований найдены решения в замкнутой форме [11]. Устойчивость построения трёхмерной карты поверхности достигается глобаль-

¹ Челябинский государственный университет

² Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

³ Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

⁴ Уфимский государственный авиационный технический университет

*E-mail: vav@csu.ru

**E-mail: melnikovav@uriit.ru

***E-mail: miroнов.kv@net.ugatu.su

****E-mail: burlutskyvv@uriit.ru

ной оптимизацией графа положений камеры с помощью алгоритма проверки возврата камеры в ранее пройденную точку [12].

СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ СЦЕНЫ

В рамках данной работы предложен новый подход к решению вариационной подзадачи ИСР на основе комбинации данных об особых точках на изображениях и карт глубины. Алгоритм построения трёхмерной карты поверхности состоит из следующих основных шагов [4]:

Шаг 1. Измерение карты глубины и вычисление нормализованной поверхности.

Шаг 2. Оценка положения камеры с помощью метода ИСР между предсказанной и измеренной поверхностями.

Шаг 3. Уточнение глобальной карты поверхности путём интегрирования измеренной поверхности в карту, построенную на предыдущих шагах.

Шаг 4. Предсказание поверхности на следующем шаге на основе модифицированной калмановской фильтрации. Возврат к шагу 2.

Для обработки визуальных характеристик сцены мы используем алгоритм сопоставления изображений на основе рекурсивного вычисления гистограмм направленных градиентов по нескольким круглым скользящим окнам и пирамидальному разложению изображения [13]. Алгоритм позволяет получить начальные значения для алгоритма регистрации изображений. В работе используется модель поверхности трёхмерной сцены как римановой поверхности, которая задаётся облаком точек в трёхмерном пространстве [14]. При решении задачи соответствия римановых поверхностей относительно изометрических или конформных преобразований используется функционал (энергия Дирихле). Полученное в результате решения вариационной задачи минимизации функционала отображение можно интерпретировать как конформную параметризацию исходной поверхности сцены на римановом многообразии. Для предсказания поверхности нами был предложен модифицированный вариант расширенной калмановской фильтрации (Extended Kalman Filter, EKF), который позволяет получить точные и непрерывно обновляемые оценки положения камеры на основе временного ряда неточных измерений её местоположения [15]. Положение камеры на этапе k обозначается $x_v(k)$ — вектор состояния. Для получения оценки вектора состояния при движении платформы с камерой по серии зашумлённых измерений модель данного процесса представлена

в виде линейного уравнения перехода с дискретным временем соответствующего типа:

$$x_v(k+1) = JT_v(k)x_v(k) + U_v(k+1) + S_v(k+1) + V_v(k+1), \quad (1)$$

где $U_v(k)$ — вектор управляющих входов, $JT_v(k)$ — матрица перехода состояния и $V_v(k)$ — вектор временно несогласованных ошибок шума процесса. В модель процесса расширенного фильтра Калмана добавлены семантические навигационные ориентиры $S_v(k+1)$, которые позволяют улучшить сходимость алгоритма определения динамического положения камеры в относительной системе координат.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ВАРИАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ИСР

Алгоритм ИСР использует два базовых шага: установление соответствия между точками двух облаков и решение вариационной задачи нахождения оптимального аффинного или ортогонального преобразования, совмещающего данные двух облаков точек.

Пусть функция $\text{Dist}(x_k, y)$ измеряет расстояние между парой точек в двух плотных облаках точек X и Y , тогда каждую итерацию в вариационной задаче классического алгоритма ИСР для произвольного аффинного преобразования можно представить следующим образом:

1. Определение ближайших точек: $\forall x_k \in X, y_k = \{y \in Y | y(x_k, y) = \min\}$.

2. Вычисление веса w_k для каждой пары точек. Определение лучшего преобразования, при котором матрица вращения R и вектор переноса T минимизируют выражение

$$E(R, T) = \frac{1}{W} \sum_{N_p} w_k \|Rx_k + T - y_k\|^2, \quad W = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_T} w_{ij}, \quad (2)$$

где N_S и N_T — количество точек в исходном и целевом облаке точек соответственно.

3. Полученное преобразование (R, T) применяется к X до тех пор, пока $|E(R, T)_i - E(R, T)_{i+1}| < \epsilon$, где i — шаг итерации алгоритма, ϵ — порог алгоритма.

Для алгоритма ИСР характерны три основные проблемы: во-первых, сходимость алгоритма сильно зависит от выбора начального приближения, во-вторых, алгоритм не принимает во внимание локальную форму поверхности вокруг каждой точки, а в-третьих, поиск ближайших точек обладает большой вычислительной сложностью. Дополнительно подход точка—плоскость накладывает более жёсткие ограничения на структуру реконструируемого простран-

ства, такой вариант алгоритма ИСР имеет плохую сходимость на сценах с малым количеством геометрических ограничений. В рамках проекта разработаны методы, улучшающие качество работы обоих основных шагов алгоритма и направленные на решение основных проблем алгоритма ИСР.

Вариационная задача в предлагаемом методе ИСР может быть сформулирована следующим образом:

$$\arg \min_{\lambda} \|J_F \lambda + R_F\|^2, \quad (3)$$

где $\lambda = [\varpi^T, v^T]^T$, $\varpi \in \mathbb{R}^3$, $v \in \mathbb{R}^3$, т.е. ригидный объект имеет шесть степеней свободы при движении, J_F — слагаемое, которое измеряет визуально-связанные характеристики точек на изображении, R_F — слагаемое, измеряющее расстояние для облаков точек.

В предложенной постановке проблемы мы находим решение вариационной задачи ИСР на основе комбинации данных об особых точках (данные о цвете сцены) и данных в виде плотного трёхмерного облака точек (данные о глубине). Функция совместной ошибки в этом случае задаётся как

$$E = \alpha E_{\text{ICP}} + (1 - \alpha) E_{\text{RGB-D}}, \quad (4)$$

где α — весовой коэффициент, выбираемый эмпирическим образом, а E_{ICP} — ошибка алгоритма регистрации для трёхмерных облаков точек, $E_{\text{RGB-D}}$ — ошибка алгоритма регистрации для изображений.

Отметим, что функция E_{ICP} может быть переписана следующим образом:

$$E_{\text{ICP}} = \sum_k \|(a^k - \exp(\hat{\lambda}) \mathbb{Z} a_n^k) n^k\|^2, \quad (5)$$

где a_n^k есть k -я вершина в кадре n ; a^k , n^k — соответствующая вершина и нормаль в кадре; $\mathbb{Z}$ — значение оценки преобразования для текущего кадра.

Принимая во внимание (5), функция совместной ошибки может быть представлена следующим образом:

$$E(\hat{A}, T) = \arg \min_{\hat{A}, T} \left[\alpha \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_f|} \sum w_i |\hat{A} P_X^i - P_Y^i|^2 \right) + (1 - \alpha) \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_d|} \sum w_j |(\hat{A} x_j + T - y_j) n_j|^2 \right) \right], \quad (6)$$

где функции P_X^i и P_Y^i устанавливают проекции особых точек из евклидовой системы координат в системы координат камеры, $\mathbb{S}_f$ — набор соответствий, состоящий из пар особых точек на изображении, которые связаны с лучшим преобразованием, ана-

логично $\mathbb{S}_d$ — набор соответствий в облаке точек, связанный с лучшим преобразованием, n — нормаль в вариационной подзадаче точка—плоскость, $\hat{A}$ — матрица преобразования, включающая компоненты матрицы вращения R , T — вектор переноса. Введём следующие определения:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$x_j = \begin{pmatrix} x_j^1 \\ x_j^2 \\ x_j^3 \end{pmatrix}, \quad y_j = \begin{pmatrix} y_j^1 \\ y_j^2 \\ y_j^3 \end{pmatrix}.$$

В рассматриваемые функционалы входят слагаемые, которые измеряют средние квадраты расстояний для визуально-связанных характерных точек с нормирующим множителем, т.е. вариация метрической характеристики функции от двух переменных, и слагаемые, измеряющие средние квадраты расстояний для плотных облаков точек на основе метрики точка—плоскость. Вместо того чтобы измерять расстояние между характерными точками в трёхмерном пространстве, мы вычисляем значение среднеквадратической ошибки в пиксельном пространстве. В однородных координатах матрица аффинных преобразований, векторы нормали и облаков точек имеют вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & t_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & t_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad x_j = \begin{pmatrix} x_j^1 \\ x_j^2 \\ x_j^3 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$y_j = \begin{pmatrix} y_j^1 \\ y_j^2 \\ y_j^3 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad n_j = \begin{pmatrix} n_j^1 \\ n_j^2 \\ n_j^3 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Обозначим через $J(A)$ следующий функционал:

$$J(A) = \arg \min_A \left[\alpha \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_f|} \sum w_i \langle \hat{A} P_X^i - P_Y^i \rangle^2 \right) + (1 - \alpha) \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_d|} \sum w_j \langle \hat{A} x_j - y_j, n_j \rangle^2 \right) \right]. \quad (9)$$

Рассмотрим более подробно второе слагаемое в выражении (8):

$$J^R(A) = \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_d|} \sum w_j \langle \hat{A} x_j - y_j, n_j \rangle^2 \right) =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_d|} \sum_j w_j (\langle Ax_j, n_j \rangle - \langle y_j, n_j \rangle)^2 \right) = \\
&= \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_d|} \sum_j w_j (\langle Ax_j, n_j \rangle^2 - \right. \\
&\quad \left. - 2\langle Ax_j, n_j \rangle \langle y_j, n_j \rangle + \langle y_j, n_j \rangle^2) \right), \quad (10)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
\langle Ax_j, n_j \rangle &= (a_{11}x_j^1n_j^1 + a_{12}x_j^2n_j^1 + a_{13}x_j^3n_j^1 + t_1n_j^1) + \\
&+ (a_{21}x_j^1n_j^2 + a_{22}x_j^2n_j^2 + a_{23}x_j^3n_j^2 + t_2n_j^2) + \\
&+ (a_{31}x_j^1n_j^3 + a_{32}x_j^2n_j^3 + a_{33}x_j^3n_j^3 + t_3n_j^3).
\end{aligned}$$

Функционал $J^R(A)$ задаётся функцией от 12 переменных. Рассмотрим компоненты градиента $\nabla J(A)$. Получим точное решение вариационной задачи относительно компонент вектора переноса T

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial J^R}{\partial t_m} = \\
&= \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_d|} \sum_{j=1}^N 2w_j \langle Ax_j, n_j \rangle n_j^m - 2w_j n_j^m \langle y_j, n_j \rangle \right) = 0, \\
&m = 1, 2, 3. \quad (11)
\end{aligned}$$

Тогда получим точное решение вариационной задачи относительно компонент матрицы преобразования A :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J^R}{\partial a_{ml}} &= \frac{1}{W} \left(\frac{1}{|\mathbb{S}_d|} \sum_{j=1}^N 2w_j \langle Ax_j, n_j \rangle x_j^l n_j^m - \right. \\
&\quad \left. - 2w_j x_j^l n_j^m \langle y_j, n_j \rangle \right) = 0, \quad m, l = 1, 2, 3. \quad (12)
\end{aligned}$$

Аналогичным образом могут быть получены точные решения для первого слагаемого в выражении (9).

Для улучшения сходимости алгоритма ИСР в работе используется результат сопоставления признаков, выделенных из соответствующих цветных видеокладов. Мы используем эвристический алгоритм для вычисления начальной оценки для процедуры установления соответствия в алгоритме ИСР. Эвристика позволяет построить окто-дерево из последнего кадра из набора F_{ds} и ранее полученных кадров F_{p-ds} . Для каждой глубины поиска в окто-дереве $d \in [O(S_1), \dots, O(S_m)]$ используется функция $O(z)$, которая определяет значение глубины в пределах окто-дерева, соответствующее заданному размеру куба z . Алгоритм можно описать как следующую последовательность шагов:

1. Создать окто-дерево B_M для n -го кадра из F_{p-ds} .
2. Создать окто-дерево B_D для $(n+1)$ -го кадра из F_{ds} .

3. Вычислить преобразование $\Delta T_{\text{best}} = (t, R)$, которое использует нуль-вектор как начальное значение для ΔT_{best} .

а) вычислить максимальное смещение и вращение ΔT_{max} в зависимости от глубины поиска d и наилучшего в данный момент преобразования ΔT_{best} :

$$\Delta T_{\text{max}} = (d_{\text{max}} - d + 1)c + \Delta T_{\text{best}},$$

где c — постоянный вектор смещения;

б) для всех дискретных 6-кортежей $\Delta T_i \in [-\Delta T_{\text{max}}, \Delta T_{\text{max}}]$ в домене $\Delta T = (x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$ смещение окто-дерева B_D относительно $\Delta T_i \cdot \Delta T \cdot T_n$.

4. Произвести оценку соответствия двух окто-деревьев путём подсчёта количества пересекающихся кубов и сохранить лучшее преобразование ΔT_{best} .

В соответствии с работой [8] известно, что может быть найдено приближённое решение вариационной задачи:

$$E_{\text{ICP}} \approx \|\mathbf{J}_{\text{ICP}}\alpha + \mathbf{r}_{\text{ICP}}\|^2, \quad (13)$$

где $\mathbf{J}_{\text{ICP}}$ и $\mathbf{r}_{\text{ICP}}$ — якобианы реконструкции для трёхмерных облаков точек.

Аналогичным образом может быть получено приближённое значение для функции $E_{\text{RGB-D}}$. Тогда, принимая во внимание (9) и (13), для каждой итерации вариационной задачи находим решение следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
&(\mathbf{J}_{\text{ICP}}^T \mathbf{J}_{\text{ICP}} + \mathbf{J}_{\text{RGB-D}}^T \mathbf{J}_{\text{RGB-D}})\lambda = \\
&= \mathbf{J}_{\text{ICP}}^T \mathbf{r}_{\text{ICP}} + \mathbf{J}_{\text{RGB-D}}^T \mathbf{r}_{\text{RGB-D}}, \quad (14)
\end{aligned}$$

где $\mathbf{J}_{\text{RGBD-D}}$ и $\mathbf{r}_{\text{RGBD-D}}$ — якобианы реконструкции для изображений.

Численное решение поставленной вариационной задачи осуществляется с помощью различных итерационных методов. В рамках проекта используется подход к определению соответствия между парами точек из двух облаков, основанный на нахождении геометрически гомотетичных элементов объектов. Такое соответствие является инвариантным относительно поворота, масштабирования и параллельного переноса. В работе был проведён сравнительный анализ точных и приближённых решений вариационной задачи на эталонных базах данных. Нами были проведены эксперименты на базах данных изображений ALOI и Indoor Segmentation and Support Inference (ECCV) [4, 12, 13]. Было установлено, что приближённые методы решения позволяют получить достаточно точные результаты при реконструкции трёхмерных сцен окружающего пространства. Таким образом, мы можем сделать вывод, что применение визуально-связанных характеристик

для решения вариационной задачи алгоритма ICP позволяет получать точное решение вариационной задачи регистрации для заданной трёхмерной сцены.

В рамках проекта проведён сравнительный анализ по надёжности обнаружения и точности локализации геометрически искажённых объектов на сцене с помощью линейных и нелинейных обнаружителей, дескрипторных методов и предлагаемого метода [4, 13]. Для получения указанного результата: проведено исследование точности трёхмерной реконструкции от количества и пространственного распределения особых точек в кадре; осуществлён поиск минимального количества особых точек, которые обеспечивают заданную точность трёхмерной реконструкции для каждого исследуемого дескриптора/метода; дано обоснование гарантированных оценок точности и вычислительной сложности предлагаемого метода на основе адаптивного подхода. Было установлено, что точность реконструкции зависит от количества особых точек в кадре нелинейным образом — в виде функции с одним ярко выраженным пиком для всех типов дескрипторов. В работах [14, 15] показано, что предлагаемый метод регистрации трёхмерных объектов является наилучшим с точки зрения ошибок пропуска и ложных тревог для широкого спектра искажений белым шумом от 50 Дц до 10 Дцб. Основные недостатки классического метода ICP связаны с ограничением области сходимости и большой вычислительной сложностью. В работе [10] показано, что проекционные методы могут сократить вычислительную сложность метода регистрации ICP с $O(N_S \log(N_T))$ для метода ICP с k -D деревом до $O(N_S)$ для метода ICP с ограничением в виде сферы или треугольника. Вычислительная сложность предлагаемого метода регистрации может быть оценена следующим образом: $n_1 + \frac{n_2 O_1}{F^1} + \dots + \frac{n_3 O_1}{F^{k-1}}$, где k — количество шагов предлагаемого алгоритма регистрации, O_1 — вычислительная сложность первого шага алгоритма, $F^1, \dots, F^{k-1}$ — параметры, определяющие разбиение облака точек на элементарные единицы, содержащие значение элемента раstra в трёхмерном пространстве. Полученные результаты дают основание полагать, что предложенный метод является эффективным для вычисления точных решений данной вариационной задачи и может быть использован в режиме реального времени.

В данной работе предложен новый подход к решению вариационной задачи для точной трёхмерной реконструкции динамического окружающего пространства на основе итеративного метода ближайших

точек. В рассматриваемые функционалы входят слагаемые, которые измеряют средние квадраты расстояний для визуально-связанных характерных точек с нормирующим множителем, и слагаемые, измеряющие средние квадраты расстояний для облаков точек на основе метрики точка—плоскость. Данный метод используется для сопоставления и регистрации облаков точек с произвольным пространственным разрешением и масштабом относительно друг друга, даёт точные оценки для сложных, динамических и крупномасштабных сцен. Комбинированный подход к решению вариационной задачи был применён на всех этапах разрабатываемого метода, в том числе при решении проблемы замыкания цикла и для глобальной оптимизации. Одним из перспективных направлений применения результатов проекта является построение точных цифровых карт рельефа местности при помощи мобильных цифровых платформ.

Источники финансирования. Работа была выполнена при поддержке Научного фонда ЮГУ (проект № 13–01–20/25), Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 2.1743.2017. ПЧ) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16–08–00342).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henry P., Krainin M., Herbst E., Ren X., Fox D. RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments // Intern. J. Robotics Res. 2012. V. 31. № 5. P. 647–663. <https://rse-lab.cs.washington.edu/postscripts/3d-mapping-iser-10-final.pdf>; <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2190637>.
2. Besl P.J., McKay H.D. A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intelligence. 1992. V. 14. № 2. P. 239–256. <https://ieeexplore.ieee.org/document/121791/similar#similar>.
3. Fuentes-Pacheco J., Ruiz-Ascencio J., Rendón-Mancha J.M. Visual Simultaneous Localization and Mapping: a Survey // Artificial Intelligence Rev. 2015. V. 43. № 1. P. 55–81. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2717465>.
4. Vokhmintsev A., Yakovlev K. A Real-Time Algorithm for Mobile Robot Mapping Based on Rotation Invariant Descriptors and ICP. Proc. 5th Analysis of Images, Social Networks and Texts. Communications in Computer and Information Science. № 661. Yakaterinburg: Springer, 2017. P. 357–369. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-52920-2_33.
5. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. № 2. P. 91–110. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.

6. *Horn B.* Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1987. V. 4. № 4. P. 629–642. <https://www.osapublishing.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-4-4-629>.
7. *Horn B., Hilden H., Negahdaripour S.* Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Orthonormal Matrices // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1988. V. 5. № 7. P. 1127–1135. <https://www.osapublishing.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-5-7-1127>.
8. *Du S., Zheng N., Meng G., Yuan Z.* Affine Registration of Point Sets Using ICP and ICA // *IEEE Signal Processing Lett.* 2008. V. 15. P. 689–692. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4666764>.
9. *Chen Y., Medioni G.* Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. *IEEE Proceedings of Conference on Robotics and Automation.* Sacramento: IEEE, 1991. P. 2724–2729. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/132043>.
10. *Rusinkiewicz S., Levoy M.* Efficient Variants of the ICP Algorithm. *IEEE Proceedings of the International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling.* Quebec City: IEEE, 2001. P. 145–152. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/924423>.
11. *Petitot J.* The Neurogeometry of Pinwheels as a Sub-Riemannian Contact Structure // *J. Physiol.* 2003. V. 97. № 2/3. P. 265–309. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14766146>.
12. *Vokhmintcev A., Timchenko M., Alina K.* Real-Time Visual Loop-Closure Detection Using Fused Iterative Close Point Algorithm and Extended Kalman Filter. *IEEE Proceedings of 3th Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).* St.-Petersburg: IEEE, 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076187>.
13. *Вохминцев А.В., Соченков И.В., Кузнецов В.В., Тухоньких Д.В.* // *ДАН.* 2016. Т. 466. № 3. С. 261–266.
14. *Echeagaray-Patron B.A., Kober V.I., Karnaukhov V.N., Kuznetsov V.V.* A Method of Face Recognition Using 3D Facial Surfaces // *J. Comms Technol. and Electronics.* 2017. V. 62. № 6. P. 648–652. <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064226917060067>.
15. *Vokhmintcev A., Botova T., Sochenkov I., Sochenkova A., Makovetskii A.* Robot Mapping Algorithm Based on Kalman Filtering and Symbolic Tags. *SPIE Proc. of Applications of Digital Image Processing XL,* № 10396. San-Diego: SPIE, 2017. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10396/103962I/Robot-mapping-algorithm-based-on-Kalman-filtering-and-symbolic-tags/10.1117/12.2273562.short>.

RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL MAPS BASED ON CLOSED-FORM SOLUTIONS OF THE VARIATIONAL PROBLEM OF MULTISENSOR DATA REGISTRATION

A. V. Vokhmintcev, A. V. Melnikov, K. V. Mironov, V. V. Burlutskiy

Presented by Academician of the RAS Yu.S. Popkov June 15, 2018

Received September 19, 2018

A closed-form solution is proposed for the problem of minimizing a functional consisting of two terms measuring mean-square distances for visually associated characteristic points on an image and meansquare distances for point clouds in terms of a point-to-plane metric. An accurate method for reconstructing three-dimensional dynamic environment is presented, and the properties of closed-form solutions are described. The proposed approach improves the accuracy and convergence of reconstruction methods for complex and large-scale scenes.

Keywords: three-dimensional reconstruction, iterative closest point algorithm, image matching algorithm, simultaneous localization and mapping.

УДК 539.955

ИССЛЕДОВАНИЕ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$) МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА НА ЯДРАХ ^{11}B

В. С. Покатилов*, академик РАН А. С. Сигов,
А. О. Макарова, В. В. Покатилов, Е. Ф. Певцов

Поступило 20.08.2018 г.

Аморфные сплавы $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$), полученные сверхбыстрой закалкой расплава, исследованы методом импульсного ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах ^{11}B при температуре 4,2 К. Аморфные сплавы состоят из микрообластей (нанокластеров) с близкими порядками типа тетрагональной $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{B}$ и $\alpha-(\text{Fe}, \text{Cr})(\text{B})$ фаз, содержащих атомы хрома в ближайшем окружении атомов железа. Оценены средние магнитные моменты магнитных атомов в ближайшей сфере атомов бора и их зависимость от состава в нанокластерах.

Ключевые слова: аморфные сплавы, ближний порядок, сверхтонкое магнитное поле, сверхтонкое взаимодействие.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846678-681>

ВВЕДЕНИЕ

Локальная атомная и магнитная структура аморфных металлических ферромагнитных сплавов $\text{Fe}-\text{B}$, содержащих примесные s -, p - и d -атомы, мало изучена. Это обусловлено тем, что классические структурные методы исследования атомной и магнитной структуры материалов основаны на дифракции рентгеновских лучей, электронов и нейтронов. Дифракционные спектры аморфных металлических сплавов, полученные этими методами, представляют собой “гало” [1], и аморфный металлический сплав рассматривается как рентгеноаморфный [2]. Дифракционный рентгеновский спектр в виде “гало” означает, что аморфные сплавы на основе $\text{Fe}-\text{B}$ состоят из микрообластей (в виде нанокристаллов или нанокластеров) размерами менее 2 нм [2].

Методы, основанные на сверхтонких взаимодействиях (ядерный магнитный резонанс, эффект Мёссбауэра), позволили установить особенности локального атомного и магнитного порядка в этом классе материалов, например существование микрообластей (нанокластеров) с различными близкими порядками (БП) [3–6], зависимость их количества от состава аморфных сплавов $\text{Fe}-\text{B}$ [5–7]. Для аморфных сплавов $\text{Fe}_{88-x}\text{B}_x$, $x = 12-25$ ат.%, методом ЯМР на ядрах ^{11}B [3–7] и на ядрах ^{57}Fe [8], а также методом мёссбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe [6] было установлено, что в области

составов $\text{Fe}-(23-25)$ ат.%B аморфные сплавы состоят преимущественно из микрообластей (нанокластеров) с БП типа тетрагональной (t) фазы Fe_3B , а при уменьшении количества бора появляются микрообласти с БП типа орторомбической (o) фазы Fe_3B и $\alpha-(\text{Fe}, \text{Cr})(\text{B})$. Однако влияние замещения атомов железа примесными d -атомами на локальную атомную и магнитную структуру аморфных сплавов $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($T - 3d$ -атомы) практически не изучено. Цель данной работы — исследование влияния замещения атомов железа на атомы хрома на локальную атомную и магнитную структуры аморфных сплавов $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$) методом ЯМР на ядрах ^{11}B .

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аморфные сплавы $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$) были приготовлены методом сверхбыстрой закалки расплава на вращающийся медный или стальной диск. Рентгенографический анализ исследуемых образцов проводился на дифрактометре Дрон-3. Образцы сплавов в виде ленточек толщиной 20 мкм и шириной 10 мм были рентгеноаморфными. Химический и рентгеноспектральный анализы показали, что содержание бора, железа и хрома в образцах отклонялось от заданных составов не более 0,1 мас.%. Спектры ядерного эхо $A(\nu)$ на ядрах ^{11}B в зависимости от частоты ν заполнения радиочастотных импульсов измерялись на импульсном спектрометре ЯМР в области частот 3–50 МГц при температуре жидкого гелия 4,2 К.

МИРЭА — Российский технологический университет,
Москва

*E-mail: pokatilov@mirea.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены спектры ЯМР на ядрах ^{11}B аморфных сплавов $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0; 5; 10; 15; 20$), измеренные при 4,2 К. Спектр ЯМР сплава $\text{Fe}_{85}\text{B}_{15}$ (рис. 1, 1) сравнительно узкий, и его максимум находится при частоте $\nu_m = 37,6$ МГц. Из рисунка видно, что замещение атомов железа на атомы хрома приводит к существенному уширению спектров и смещению их в сторону меньших частот.

Анализ спектров ЯМР на ядрах ^{11}B в аморфных сплавах $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0; 5; 10; 15; 20$) (рис. 1) проводили с учётом данных работ [3–11]. Согласно результатам ЯМР и мёссбауэровской спектроскопии [3–9] аморфные сплавы $\text{Fe}_{85}\text{B}_{15}$ содержат микрооб-

ласти (нанокластеры) с БП типа $\alpha\text{-Fe(B)}$ и боридов Fe_3B . В работах [7, 8] были оценены относительные доли S кластеров типа $\alpha\text{-Fe(B)}$ и Fe_3B в аморфном сплаве $\text{Fe}_{85}\text{B}_{15}$; они равны $S_1 : S_2 = (50 \pm 5) : (50 \pm 5)$ соответственно. В отожжённых аморфных сплавах $(\text{Fe, Cr})_{85}\text{B}_{15}$ обнаружено методами эффекта Мёссбауэра и электронной микроскопии [6, 9–12], что добавка хрома приводит к появлению нанокристаллов типа тетрагонального (t) борида $t\text{-Fe}_3\text{B}$ и типа $\alpha\text{-Fe(B)}$, содержащих атомы хрома. Мы полагаем, что исследуемые рентгеноаморфные сплавы $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0; 5; 10; 15; 20$) содержат нанокластеры типа $\alpha\text{-(Fe, Cr)(B)}$ и $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ с разными количествами атомов хрома в нанокластерах в зависимости от состава сплава. Спектры ЯМР на рис. 1 (1–5) раскладывались на два гауссовских парциальных спектра при использовании пакета программ Origin для состояний атомов бора в нанокластерах типа фаз $\alpha\text{-(Fe, Cr)(B)}$ и $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$. При этом резонансные частоты для ядер ^{11}B и ширина спектров в этих нанокластерах варьировались. Оказалось, что относительные площади S_1 для фазы $\alpha\text{-(Fe, Cr)(B)}$ и S_2 для фазы $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ этих парциальных спектров и соответственно количество нанокластеров в сплавах в пределах оценки практически не зависят от состава сплава и равны $(60 \pm 7) : (40 \pm 7)$.

На рис. 2 представлены концентрационные зависимости максимумов распределений резонансных частот ν_m ядер ^{11}B , измеренных при температуре 4,2 К, в двух типах нанокластеров (соответственно ν_1 для нанокластеров типа $\alpha\text{-(Fe, Cr)(B)}$ и ν_2 для нанокластеров типа $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ в аморфных сплавах $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0; 5; 10; 15; 20$). При замещении

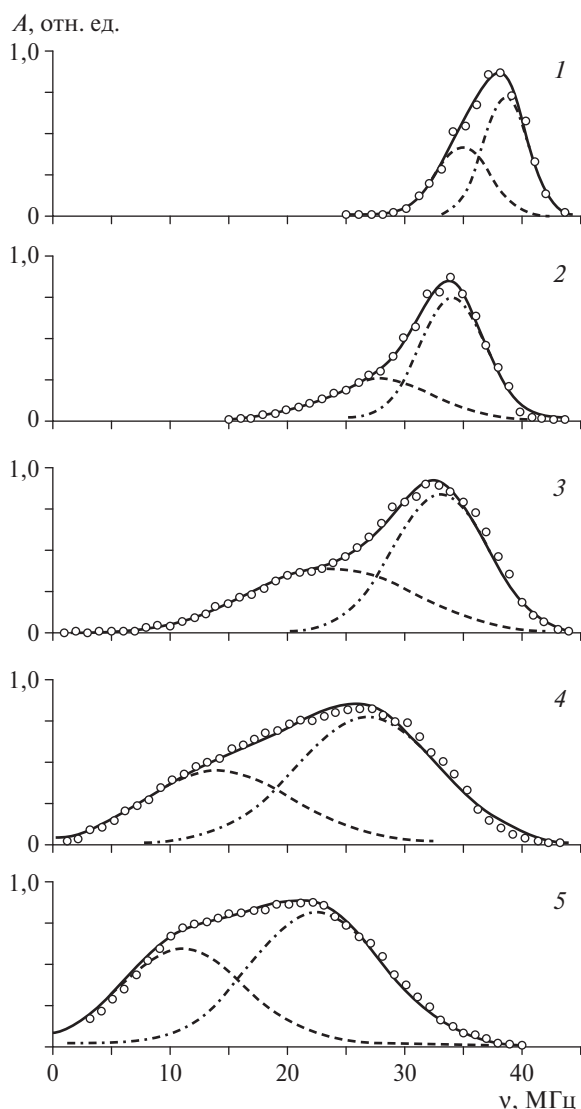


Рис. 1. Спектры ЯМР $A(\nu)$ на ядрах ^{11}B в аморфных сплавах $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ при 4,2 К: $x = 0$ (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5).

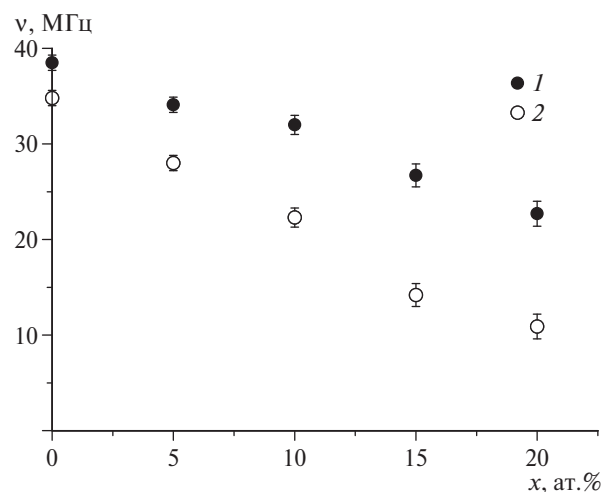


Рис. 2. Зависимости от концентрации максимумов ν_1 и ν_2 в распределениях резонансных частот $A(\nu)$ ядер ^{11}B , измеренных при 4,2 К, в нанокластерах типа $\alpha\text{-(Fe, Cr)(B)}$ (1) и $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ (2) в аморфных сплавах $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$).

атомов железа атомами хрома наблюдается существенное уменьшение резонансных частот ν_1 и ν_2 , при этом в нанокластерах t -(Fe, Cr)₃B частоты ν_2 уменьшаются сильнее.

Оценим средние локальные магнитные моменты магнитных атомов в ближней координационной сфере (БКС) атомов бора в нанокластерах аморфных сплавов Fe_{85-x}Cr_xB₁₅ ($x = 5-20$). Атом бора не имеет магнитного момента, и сверхтонкое магнитное поле (СТМТ) $H(B)$ на ядре ^{11}B определяется ферми-контактным взаимодействием [3, 4, 7, 8]. Это поле $H(B)$ пропорционально поляризации электронной спиновой плотности на ядре рассматриваемого атома, обусловленной s - d -обменным взаимодействием s -электронов проводимости с $3d$ -электронами магнитных атомов железа. СТМТ на ядрах немагнитного атома бора записывается в виде

$$H(B) = a(B)N_1\mu_1, \quad (1)$$

где $a(B)$ — константа сверхтонкого взаимодействия для ядер ^{11}B , N_1 — число магнитных атомов в БКС атома бора, μ_1 — средний магнитный момент магнитных атомов в БКС атома бора; N_1 определяется ближним порядком магнитных атомов вокруг атома бора и зависит от типа нанокластеров α -Fe(B) или t -Fe₃B в аморфных сплавах Fe—B. В этих сплавах в нанокластере типа α -Fe(B) атом бора содержит в БКС восемь атомов железа $N_1 = 8$, а в нанокластере типа t -Fe₃B — девять атомов железа $N_1 = 9$ [3, 4, 6, 7]. Константы $a(B)$ в нанокластерах α -Fe(B) и Fe₃B оценивались в работах [3, 4, 6, 7]. Константа $a(B)$ в t -Fe₃B равна $a(B) = 1,48 \text{ кЭ}/(\mu_B \cdot \text{магнитный атом})$, в α -Fe₃B $a(B) = 1,51 \text{ кЭ}/(\mu_B \cdot \text{магнитный атом})$ и в α -Fe(B) $a(B) = 1,65 \text{ кЭ}/(\mu_B \cdot \text{магнитный атом})$. Для оценки средних локальных магнитных моментов магнитных атомов μ_1 в БКС атома бора в аморфных сплавах Fe_{85-x}Cr_xB₁₅ ($x = 0; 5; 10; 15; 20$) в нанокластерах типа t -(Fe, Cr)₃B константу $a(B)$ примем равной $a(B) = 1,48 \text{ кЭ}/(\mu_B \cdot \text{магнитный атом})$, а в нанокластерах α -(Fe, Cr)(B) — $1,65 \text{ кЭ}/(\mu_B \cdot \text{магнитный атом})$.

В табл. 1 представлены концентрационные зависимости резонансных частот ядер ^{11}B ν_1 и ν_2 , соответствующих им СТМТ $H_1(B)$ и $H_2(B)$ на ядрах ^{11}B и локальных магнитных моментов магнитных атомов μ_1 , рассчитанных по формуле (1), в БКС атомов бора в кластерах типа α -(Fe, Cr)(B) и t -(Fe, Cr)₃B. Как видно из табл. 1, средние магнитные моменты μ_1 магнитных атомов в БКС атома бора значительно уменьшаются при замещении атомов железа атомами хрома в области составов Fe_{85-x}Cr_xB₁₅ ($x = 0; 5; 10; 15; 20$) со скоростью $\frac{\delta\mu_1}{\delta x} = 0,044 \mu_B/(\text{ат.}\% \text{ атома}$

Cr) и $\frac{\delta\mu_1}{\delta x} = 0,067 \mu_B/(\text{ат.}\% \text{ атома Cr})$ в нанокластерах α -(Fe, Cr)(B) и t -(Fe, Cr)₃B. Мы полагаем, что снижение μ_1 обусловлено тем, что в исследуемых аморфных сплавах в области составов $x = 5-20$ атомы хрома имеют меньшие по величине и отрицательные (по отношению к магнитному моменту атомов железа) атомные магнитные моменты, аналогично тому, что наблюдается в системе α -Fe_{1-x}Cr_x и Fe_{85-x}Cr_xB₁₅ [12–14]. В бинарных сплавах Fe_{1-x}Cr_x при $x = 0-0,2$ магнитные моменты атомов железа лежат в области значений $2,2-2,1 \mu_B$, а магнитные моменты атомов хрома отрицательны и лежат в области значений $(-1,0)-(-0,7) \mu_B$. Замещение атомов железа с магнитными моментами $2,2-2,1 \mu_B$ атомами хрома с магнитными моментами $(-1,0)-(-0,7) \mu_B$ в исследуемых сплавах приводит к сильному снижению среднего магнитного момента в БКС атомов бора и, следовательно, резонансных частот и СТМТ на ядрах ^{11}B .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сверхбыстрой закалкой расплава получены аморфные сплавы Fe_{85-x}Cr_xB₁₅ ($x = 0-20$). Рентгенографический анализ показал, что образцы были рентгеноаморфными. Анализ спектров ЯМР на ядрах ^{11}B показал, что рентгеноаморфные сплавы Fe_{85-x}Cr_xB₁₅ ($x = 0-20$) состоят из микрообластей (нанокластеров) с ближними порядками типа тетра-

Таблица 1. Зависимость значений резонансных частот ν_m , сверхтонких магнитных полей $H(B)$ на ядрах ^{11}B , средних значениях магнитных моментов μ_1 в ближайшей сфере атома бора, площади парциальных спектров S нанокластеров с ближними порядками типа α -(Fe, Cr)(B) и t -(Fe, Cr)₃B в аморфных сплавах Fe_{85-x}Cr_xB₁₅

$x(\text{Cr}), \text{ ат.}\%$	α -(Fe, Cr)(B)				t -(Fe, Cr) ₃ B			
	ν_1 , МГц $\pm 0,25$	$H_1(B)$, кЭ $\pm 0,3$	$\mu_1, \mu_B \pm 0,04$	$S_1 \pm 7, \%$	ν_2 , МГц $\pm 0,25$	$H_2(B)$, кЭ $\pm 0,3$	$\mu_2, \mu_B \pm 0,04$	$S_2 \pm 7, \%$
0	38,44	28,14	2,13	59	34,82	25,49	1,91	41
5	34,07	24,94	1,89	64	28,0	20,50	1,54	36
10	32,00	23,42	1,77	60	22,3	16,32	1,23	40
15	26,70	19,54	1,48	63	14,2	10,39	0,78	37
20	22,7 0	16,62	1,26	63	10,9	7,98	0,60	37

гональной $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ и $\alpha\text{-(Fe, Cr)(B)}$ фаз. Замещение атомов железа атомами хрома приводит к резкому уменьшению резонансных частот ν и сверхтонких полей H на ядрах ^{11}B в двух типах нанокластеров. В нанокластере типа $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ частоты ν уменьшаются быстрее. Оценены средние значения магнитных моментов μ_1 магнитных атомов в ближайшей координационной сфере атомов бора в нанокластерах. Обнаружено, что моменты μ_1 в нанокластерах типа $\alpha\text{-(Fe, Cr)(B)}$ уменьшаются от $2,13 \pm 0,04 \mu_B$ в сплаве $\text{Fe}_{85}\text{B}_{15}$ до $1,26 \pm 0,04 \mu_B$ в сплаве $\text{Fe}_{65}\text{Cr}_{20}\text{B}_{15}$, а в нанокластерах типа $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ уменьшаются от $1,91 \pm 0,04 \mu_B$ в сплаве $\text{Fe}_{85}\text{B}_{15}$ до $0,60 \pm 0,04 \mu_B$ в сплаве $\text{Fe}_{65}\text{Cr}_{20}\text{B}_{15}$. Этот эффект обусловлен тем, что атомы хрома добавляют в аморфные сплавы $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 5-20$) свои отрицательные (по отношению к атомам железа) магнитные моменты.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 2017/112, проект № 3.5859.2017.БЧ) и МИРЭА — Российского технологического университета (Грант Университетский НИЧ-41).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аморфные металлические сплавы / Под ред. Ф.Е. Любарского. М.: Металлургия, 1987. 572 с.
2. Глезер А.М. // Рос. хим. журн. 2002. Т. XLVI. № 5. С. 57–63.
3. Zhang Y.D., Budnick J.I., Ford J.C., Hines W.A., Sanches F.H. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. P. 3231–3233.
4. Pokatilov V., Djakonova N. // Hyperfine Interact. 1990. V. 59. P. 525–528.
5. Zhang Y.D., Budnick J.I., Ford J.C., Hines F.H. // J. Mag. and Magn. Mater. 1991. V. 100. P. 13–37.
6. Покатилов В.С., Покатилов В.В., Дьяконова Н.Б. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 11. С. 1630–1632.
7. Покатилов В.С. // ФТТ. 2007. Т. 49. С. 2113–2117.
8. Покатилов В.С. // ФТТ. 2009. Т. 51. С. 134–140.
9. Покатилов В.С., Дмитриева Т.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 8. С. 1159–1163.
10. Покатилов В.С., Дмитриева Т.Г., Покатилов В.В., Дьяконова Н.Б. // ФТТ. 2012. Т. 54. С. 1680–1685.
11. Покатилов В.С., Дмитриева Т.Г., Покатилов В.В., Китаев В.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 3. С. 934–936.
12. Дроздова М.А., Глезер А.А., Красавин Ю.А., Саввин А.А. // ФММ. 1989. Т. 67. С. 896–901.
13. Aldred A.T., Fainford B.D., Kouvel J.S., Hicks T.J. // Phys. Rev. 1976. V. 14. P. 228–234.
14. Chan W.S., Shen B.G., Lo H.Y., Yu B.L. // Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals. Sendai. 1981. P. 1137–1140.

^{11}B NMR STUDY OF AMORPHOUS ALLOYS $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$)

V. S. Pokatilov, Academician of the RAS A. S. Sigov,
A. O. Makarova, V. V. Pokatilov, E. F. Pevtsov

Received August 20, 2018

Amorphous alloys $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0-20$), prepared by rapid quenching of the melt, have been studied by pulsed nuclear magnetic resonance (NMR) on nuclei ^{11}B at a temperature of 4,2 K. The amorphous alloys consist of nanoclusters with short-range order of the tetragonal $t\text{-(Fe, Cr)}_3\text{B}$ and $\alpha\text{-(Fe, Cr)}$ phases which contain chromium atoms in the nearest surroundings of boron atoms. The average magnetic moments of magnetic atoms in the nearest sphere of boron atoms in nanoclusters and their dependence on the chromium content in alloys are estimated.

Keywords: amorphous alloys, short-range order, hyperfine magnetic field, hyperfine interaction.

УДК 669.018.234

ВАРИАЦИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
НИКЕЛИДА ТИТАНА ПРИ ЦИКЛИРОВАНИИ
В ИНТЕРВАЛЕ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

В. Я. Ерофеев*, член-корреспондент РАН М. В. Кабанов

Поступило 23.07.2018 г.

Приведены результаты анализа многолетних вариаций скорости деформации TiNi-элемента при циклировании в интервале мартенситного превращения. Показано, что факторы, участвующие в формировании состояния окружающей среды, могут вызывать неустойчивость в работе функциональных технических элементов, подобных функциональным элементам на основе никелида титана.

Ключевые слова: датчики, мониторинг окружающей среды, аварийные ситуации, металл с эффектом памяти формы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846682-685>

В настоящее время активное внедрение функциональных элементов на базе никелида титана в устройствах различного назначения [1–4], в том числе в качестве датчиков для контроля ряда параметров атмосферы [5], определяет актуальность исследований эксплуатационной надёжности этих элементов в зависимости от внешних условий.

Для таких исследований был использован элемент, изготовленный из сплава TiNi эквиатомного состава, подвергнутый предварительному циклированию (около 1000 циклов) в интервале мартенситного превращения при постоянной нагрузке 50 МПа.

Исследуемый сплав был получен по технологии, разработанной в ИМКЭС СО РАН, с применением специального металлургического вакуумного оборудования (рис. 1). Использован метод индукционного нагрева металла в защитной атмосфере. Автоматическое перемешивание расплава обеспечивало высокую однородность состава и точность в соотношении между долями атомов титана и никеля. Испытуемые образцы из полученных слитков производили стандартными кузнечно-прессовыми операциями. Финишная термообработка заключалась в отжиге в вакуумной печи при 800 °С в течение 1 ч, после чего образец имел температуру начала перехода в низкотемпературную мартенситную фазу, равную 20 ± 2 °С.

Долговременное термоциклирование под постоянной нагрузкой 50 МПа проводили в автоколеба-

тельном режиме по схеме, описанной в [6]. Эксперимент проводился в термовлагодостойчивых условиях: суточное отклонение температуры в рабочей камере не превышало 0,5 °С, влажность оставалась постоянной. Измеряемым параметром являлась скорость деформации образца, определяемая по вспышкам лампы накаливания, которая в автоколебательном режиме включалась и выключалась, обеспечивая изменение температуры образца отно-

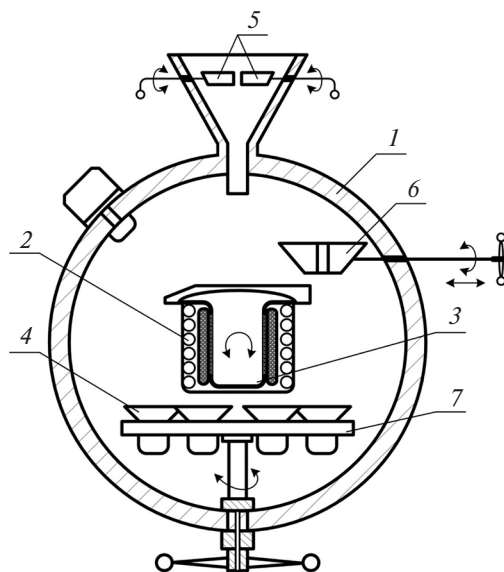


Рис. 1. Схема камеры плавильной установки: 1 — водоохлаждаемая плавильная камера, 2 — водоохлаждаемый индуктор, 3 — плавильный тигель поворотного типа, 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор, 5 — дозаторные ковши, 6 — транспортный ковш, 7 — водоохлаждаемый шестипозиционный карусельный барабан.

Институт мониторинга климатических
и экологических систем Сибирского отделения
Российской Академии наук, Томск

*E-mail: erofeev_vy@sibmail.com

сительно точки мартенситного превращения. Наблюдаемая при этом амплитуда изменения формы образца была фиксированной, что обеспечивалось установленными концевыми бесконтактными датчиками. Таким образом, зная пройденный путь и время, за которое происходит изменение и восстановление формы, получали искомый параметр — скорость деформации образца. Скорость измеряли в режиме мониторинга с 10-минутным шагом. Ошибка в измерении составляла 0,2%. Измеренная величина в непрерывном режиме фиксировалась блоком управления и передавалась на ЭВМ с последующим построением графиков временной зависимости скорости деформации. Графики построены с учётом того, что фоновое значение скорости деформации условно принято за единицу. Их типичный вид и поведение переменной в отдельных случаях представлены на рис. 2. Иррегулярное поведение переменной (рис. 2а) перемежается с квазипериодической зависимостью (рис. 2б). Присутствуют отдельные виды зависимостей, такие как пикообразная (а, 14 ноября 2013 г.), П-образная (б, 4 июля 2016 г.), медленный подъём до максимума и быстрый спад (в); быстрый подъём и медленный спад (г).

Анализ временной зависимости скорости деформации показал, что на протяжении всего периода наблюдений её среднегодовая вариация колеблется в пределах 3–5%. В то же время в течение года возникают от 4 до 6 случаев, когда отклонение от фона составляет свыше 10%. При этом воспроизводимость наблюдаемой свыше семи лет картины в целом от года к году близка к 100%. Таким образом, деформационные параметры никелида титана в условиях циклирования в интервале фазовых переходов под постоянной нагрузкой испытывают обратимую временную зависимость, в том числе скачкообразную.

Применяемые в технике и медицине функциональные элементы из никелида титана имеют три основных эксплуатационных параметра: величину восстанавливаемой деформации, развиваемые усилия и количество рабочих циклов до разрушения. Описанные вариации параметров деформации напрямую могут оказывать влияние на вторую из указанных характеристик и косвенно — на две другие. Такое воздействие может вывести рабочие характеристики TiNi-датчика за рамки штатного режима с вытекающими последствиями. При этом обратимый характер изменения рабочих характеристик

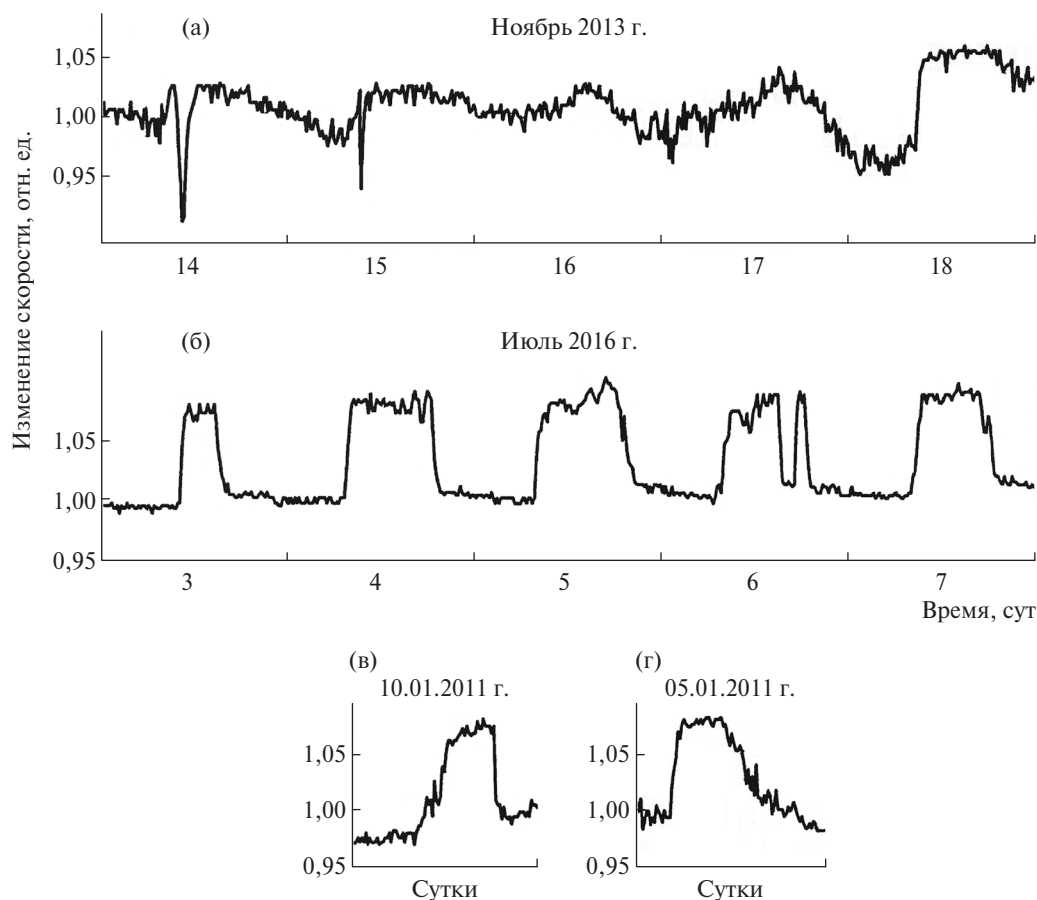


Рис. 2. Временная зависимость скорости деформации TiNi-элемента.

может ввести аварийную комиссию в заблуждение: в момент анализа нештатной ситуации датчик может показать штатные параметры из-за указанной выше обратимости. Описанные случаи с TiNi-датчиками в отношении нештатных ситуаций могут быть распространены на любые другие типы датчиков, многокомпонентное или многослойное вещество которых в своих диаграммах состояний имеет участки с точками фазовых превращений вблизи термодинамических условий эксплуатации. В этом случае воздействие внешних полей может обратимо выводить параметры таких датчиков из штатного режима.

Предварительные сведения о факторе, вызывающем представленные закономерности, могут быть получены с помощью метода сравнения одновременных ходов кривых показаний TiNi-элемента и значений какого-либо параметра, характеризующего состояние окружающей среды [7]. При этом следует учесть, что маловероятно, чтобы предполагаемый фактор имел исключительно термодинамическую основу. Это следует из того, что TiNi-элемент в ходе испытаний находится в практически неизменных термодинамических условиях. Поэтому при отборе из доступных параметров среды для сравнения была выбрана абсолютная влажность приземной атмосферы. Известно, что малоамплитудные вариации влажности связаны с вариациями концентрации капельных квазикристаллических кластеров, образованных за счёт электрического межкапельного взаимодействия [8]. Данные по влажности были получены из показаний прибора АМК-3 [9], установленного на метеоплощадке ИМКЭС СО РАН на расстоянии в несколько десятков метров от места расположения TiNi-элемента.

На рис. 3 показан ход кривых, полученных за один и тот же период времени. Совпадение графиков близко к 100% с учётом того, что в отличие от случая сравнения хода кривых показаний состояния TiNi-элемента с кривыми значений атмосферного давления [7] участки совпадения по абсолютному значению перемежаются с участками, где совпадение идёт по осреднённым показаниям TiNi-элемента (участки, обозначенные пунктирными линиями). Такая особенность, по-видимому, связана с механизмом формирования влаги в атмосфере, в том числе с инерционностью этого процесса.

Поскольку в процессе формирования абсолютной влажности участвует электрическая составляющая, то целесообразно было обратиться дополнительно к рассмотрению хода кривых TiNi-элемента и хода кривой того параметра атмосферы, который имеет прямое отношение к электричеству, а именно к напряжённости электрического поля приземной атмосферы. Данные электрического поля были взяты из показаний датчика “Поле-2” [10], также расположенного в нескольких десятках метров от TiNi-элемента. На рис. 4 представлен ход кривых TiNi-элемента и электрического поля. Здесь также наблюдается совпадение (в данном случае зеркальное) графиков, близкое к 100%.

Синхронный ход зависимостей свидетельствует о том, что в попарных системах металл — влажная среда и металл — электрическое поле происходят, в силу определённых причин одновременные процессы в каждой из участвующих субстанций. В обоих случаях присутствует модуляция электрического потенциала, которая непосредственно участвует

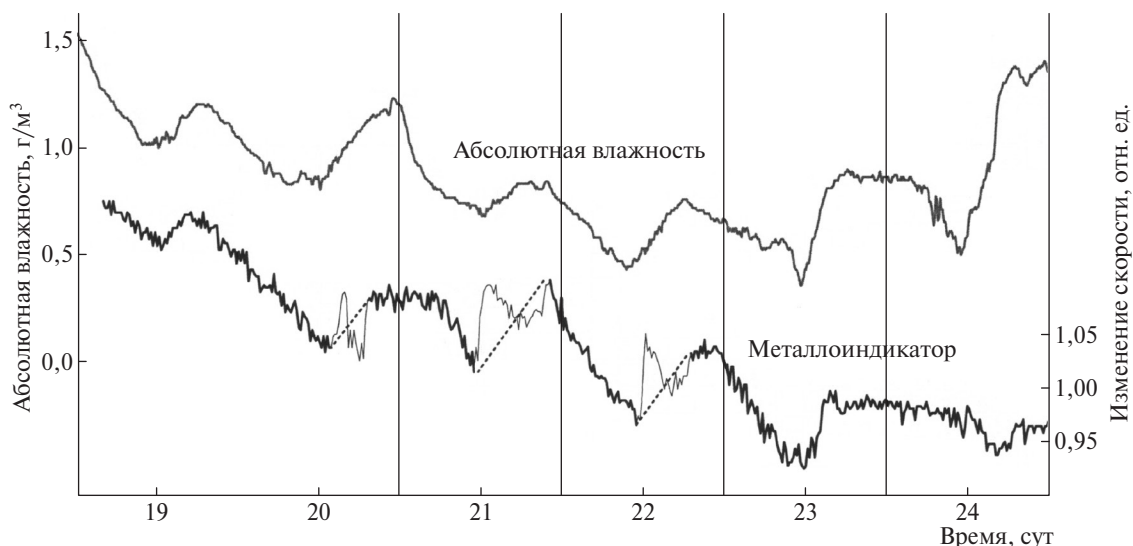


Рис. 3. Сравнение временной зависимости скорости деформации TiNi-элемента и абсолютной влажности в приземной атмосфере (по данным 19–24 февраля 2011 г.).

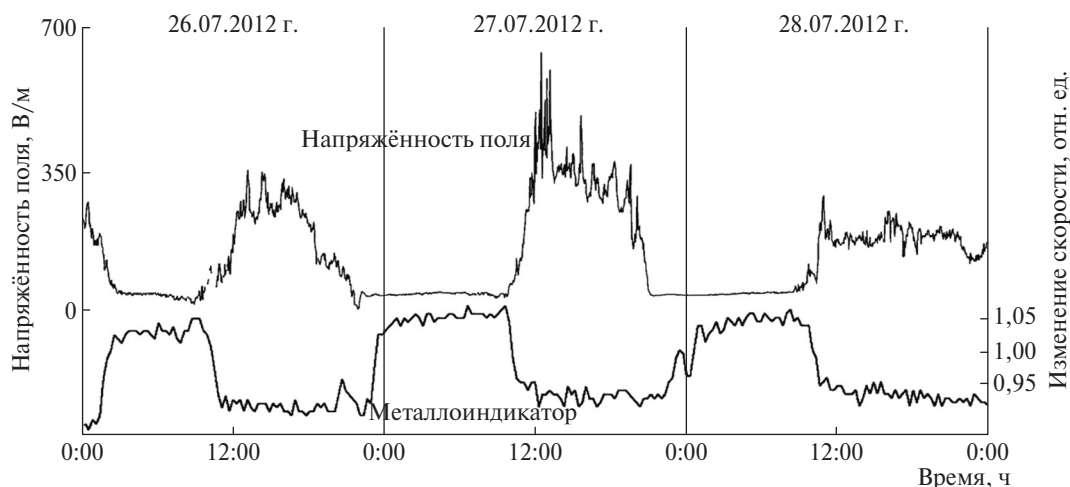


Рис. 4. Сравнение временной зависимости скорости деформации TiNi-элемента и напряжённости электрического поля в приземной атмосфере.

в формировании вариаций влажности и напряжённости электрического поля. Однако непосредственное влияние наблюдаемых вариаций атмосферного электрического поля (сотни вольт на метр) представляется невозможным для мартенситных превращений в парамагнитном TiNi-элементе. Поэтому можно говорить о наличии общей внешней синхронизации колебаний параметров в рассматриваемых случаях. Тем более что в процессах формирования атмосферного электричества могут играть роль различные внешние факторы, в том числе внеземного происхождения [11].

Представленные данные свидетельствуют о том, что внешние факторы, формирующие состояние окружающей среды, могут оказывать влияние на работу контролируемых, регулирующих и других функциональных элементов, что необходимо учитывать при разработке и эксплуатации технических средств, связанных с повышенными рисками, а также при анализе аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Humbeeck J. // Mater. Sci. Eng. A. 1999. V. 273–275. P. 134.
2. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Applications. Monreal: ETS Publ., 2003. P. 851.
3. Shelyakov A.V., Larin S.G., Ivanov V.P., Sokolovski V.V. // J. Phys. IV. 2003. V. 112. P. 1169–1172.
4. Yongqing F., Hejun D., Weimin H., et al. // Sensors. A. 2004. V. 112. P. 395.
5. Выборнов П.В., Ерофеев В.Я., Кабанов М.В. Способ измерения атмосферного давления. Пат. РФ 2572789 // Бюл. 2014. № 2. 5 с.
6. Кабанов М.В., Ерофеев В.В., Ерофеев В.Я. Устройство для учебной демонстрации физико-химических явлений. Пат. РФ 2374698 // Бюл. 2009. № 33. 8 с.
7. Ерофеев В.Я., Кабанов М.В., Выборнов П.В., Комаров А.И. // ДАН. 2015. Т. 465. № 6. С. 727–731.
8. Шавлов А.В., Соколов И.В., Хазанов В.Л., Джуманджи В.А. // ДАН. 2015. Т. 461. № 6. С. 704–709.
9. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Ильичевский В.С. и др. // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.
10. Датчик напряженности электрического поля “Поле-2”. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л.: Главная геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова, 1991. 35 с.
11. Gurevich A.V., Karashtin A.N. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. 185005.

VARIATIONS IN THE STRAIN PARAMETERS OF TITANIUM NICKELIDE DURING MARTENSITIC TRANSFORMATION CYCLING

V. Ya. Erofeev, Corresponding Member of the RAS M. V. Kabanov

Received July 23, 2018

The results of analyzing the long-term variations in the strain rate of a TiNi element during martensitic transformation cycling have been reported. It is shown that the factors involved in the formation of the state of the environment lead to unstable operation of functional technical elements similar to those based on titanium nickelide.

Keywords: sensors, environmental monitoring, emergencies, shape memory effect metal.

УДК 523.68

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ПРИЛИВНОГО ВЫСТУПА РАННЕЙ ЛУНЫ

С. А. Воропаев*, А. Ю. Днестровский, академик РАН М. Я. Маров

Поступило 27.07.2018 г.

Исследованы ограничения, накладываемые на орбиту и распределение плотности ранней Луны современными измерениями её “реликтового” приливного выступа. Разработана полуаналитическая методика расчётов гравитационных потенциалов, позволяющая исследовать эквипотенциальные поверхности самогравитирующей неоднородной массы во внешнем поле. Получены универсальные выражения для двухслойной модели мантия—кора ранней Луны, позволяющие сделать общие оценки плотности верхнего слоя коры и полуоси ее орбиты в случае “приливного захвата” Землёй.

Ключевые слова: Луна, Земля, эволюция орбиты, приливное взаимодействие, дифференцирование коры—мантия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846686-690>

ВВЕДЕНИЕ

С конца XVIII в., начиная с исследований Лапласа, известно, что приливный выступ Луны аномально большой — больше, чем предсказывается гидростатической теорией для современного вращения и орбиты Луны. Последние измерения миссии GRAIL показали, что (нормализованные) коэффициенты $|C_{20}|$ и C_{22} разложения гравитационного поля Луны по сферическим гармоникам, характеризующие размер выступа, равны $203,2 \cdot 10^{-6}$ и $22,4 \cdot 10^{-6}$ соответственно [1]. Это примерно в 22 и 8 раз больше, чем их соответствующие гидростатические значения [2]. После коррекции вклада больших морских бассейнов (базальты) и смещения оси вращения коэффициенты $|C_{20}|$ и C_{22} приводятся к значениям $156 \cdot 10^{-6}$ и $38,8 \cdot 10^{-6}$ соответственно, что остаётся примерно в 17 и 14 раз больше соответствующих им гидростатических значений.

В настоящее время преобладающая гипотеза “лишней” выпуклости Луны — это “замороженный” реликтовый выступ, оставшийся со времени, когда Луна была ближе к Земле, вращалась быстрее и испытывала более значительные приливные силы со стороны Земли, чем сейчас [3]. Поскольку впоследствии Луна отделилась от Земли из-за приливной диссипации и остыла, сформировавшийся внешний жёсткий слой (литосфера) был частично или полностью сохранён в ходе гидростатической компенсации фигуры планеты [4].

С геофизической и геохимической точек зрения развитие приливного выступа Луны представляет собой непрерывный динамичный процесс, тесно увязанный с формированием коры и мантии. В данной работе, используя полуаналитический метод и современные данные селенодезии, мы проанализируем начальную фазу развития приливного выступа и получим по его уточнённым размерам ограничения на параметры орбиты и распределение плотности ранней Луны.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ
МЕТОД

Приливо-вращательное воздействие на формирование ранней коры и мантии Луны зависело от скорости её вращения и орбитального состояния. В работе [5] было показано, что выступ не мог быть сформирован на орбите с большим эксцентриситетом вследствие возникавших больших упругих деформаций. В данной работе мы также предположим, что в начале формирования приливного выступа Луна находилась на круговой и синхронной орбите относительно Земли, т.е. “приливный захват” уже произошёл.

В декартовой системе координат с началом, помещённым в центр инерции Луны, и осью X , направленной на Землю, внутренний приливный потенциал принимает следующий вид [6]:

$$V_l = \frac{-GM_F}{D^3} \left(x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{2}z^2 \right), \quad (1)$$

где G — гравитационная постоянная, M_F — масса Земли, D — большая полуось лунной орбиты. Цен-

Институт геохимии и аналитической химии
им В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва
*E-mail: voropaev@geokhi.ru

требужный потенциал внутри Луны определяется выражением

$$V_{\omega} = -\frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2), \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi/T$ — угловая скорость, T — период вращения Луны. Синхронное вращение Луны по круговой орбите приводит к $GM_E/D^3 = \omega^2$ (3-й закон Кеплера), и тогда общий потенциал можно записать в виде

$$V_t + V_{\omega} = -\frac{1}{2}\omega^2(3x^2 - z^2). \quad (3)$$

Поскольку на начальной стадии упругая литосфера Луны ещё не успела сформироваться, первичная кора, не обладающая значительной вязкостью, должна принимать форму эквипотенциальной поверхности в виде трёхосного эллипсоида, устраняющей сдвиговые напряжения. Для однородного случая внутренний гравитационный потенциал Луны будет определяться выражением

$$V_g = G\pi abc(-U_0 + U_ax^2 + U_by^2 + U_cz^2), \quad (4)$$

где a , b и c — главные полуоси эллипсоида ($a > b > c$), ρ — средняя плотность,

$$\begin{aligned} U_0 &= \int \frac{ds}{\Delta}, \quad \Delta = [(a^2 + s)(b^2 + s)(c^2 + s)]^{1/2}, \\ U_a &= \int \frac{ds}{(a^2 + s)\Delta}, \quad U_b = \int \frac{ds}{(b^2 + s)\Delta}, \\ U_c &= \int \frac{ds}{(c^2 + s)\Delta}, \end{aligned} \quad (5)$$

а интегралы берутся от 0 до ∞ . В дальнейшем мы будем использовать безразмерные аналоги выражений (5) с помощью отношений полуосей $T_1 = (b/a)^2$ и $T_2 = (c/a)^2$, экваториальный (E_1) и полярный (E_2) эксцентриситеты внешней поверхности при этом равны $E_1 = 1 - T_1$ и $E_2 = 1 - T_2$ соответственно.

Поскольку эксцентриситеты малы, с хорошей точностью можно пользоваться линейным приближением для компонент гравитационного потенциала

$$\begin{aligned} U_a &\approx \frac{2}{3} + \frac{1}{5}(E_1 + E_2), \quad U_b \approx \frac{1}{5}(3E_1 + E_2) + \frac{2}{3}, \\ U_c &\approx \frac{1}{5}(E_1 + 3E_2) + \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

Результирующая сила, действующая на вещество внутри Луны, будет определяться выражением

$$\mathbf{F} = -\text{grad } V, \quad V = V_t + V_{\omega} + V_g. \quad (6)$$

В случае полностью однородной, изотропной и изотермической ранней Луны гидростатическая теория планеты с мантийным веществом в виде вяз-

кой жидкости без упругой литосферы (для поддержания длительных сдвиговых напряжений) предсказывает фигуру в виде трёхосного эллипсоида с фиксированным отношением эксцентриситетов:

$E_1 \approx \frac{3}{4}E_2$, и их абсолютными значениями, зависящими от $d = D/R_E$:

$$[U_a(T_1, T_2) - T_1 U_b(T_1, T_2)]\sqrt{T_1 T_2} \approx \frac{2\rho_E}{\rho} \frac{1}{d^3}. \quad (7)$$

Например, для $d = D/R_E = 20$ разность главных полуосей будет составлять: $a - b \approx 1,35$ км, $a - c \approx 1,81$ км. При этом принимаются современные значения средней плотности Земли $\rho_E = 5520$ кг/м³ и Луны $\rho_B = 3345$ кг/м³. В однородной модели отношение коэффициентов $|C_{20}|/C_{22}$ постоянно и равно 3,3, что значительно отличается от диапазона величин наблюдаемых отношений: $|C_{20}|/C_{22}$ — от 9,2 до 4 (после коррекции), $a - b \approx 1$ км и $a - c \approx 2$ км. Вариации параметра орбиты $d = D/R_E$ от 10 до 40 не позволяют приблизиться к наблюдаемым отношениям разностей полуосей фигуры (табл. 1), поэтому необходимо учитывать неоднородность внутренней структуры ранней Луны.

МОДЕЛЬ МАГМАТИЧЕСКОГО ОКЕАНА МАНТИЯ—КОРА

Геохимические данные о породах Луны, собранные советскими АМС Луна-16, -20 и -24 [7] и миссиями Апполон 11–17 [8], свидетельствуют о расплавленном магматическом океане (МО), покрывавшем всю поверхность ранней Луны минимум 200 млн лет после её образования. Лёгкая выплавка преимущественно анортозитового состава плотностью $\rho_0 \approx 2600$ –2700 кг/м³ сформировала первичную кору толщиной примерно 70 км, а более плотные базальты с повышенным содержанием железа и титана плотностью $\rho_m \approx 3300$ –3800 кг/м³ сформировали первичную мантию. Полуаналитический подход, использующий эквипотенциальные поверхности для слоёв разной плотности, позволяет сделать необходимые оценки функциональной связи их эксцентриситетов.

Таблица 1. Параметры фигуры ранней Луны (однородная модель)

$d = D/R_E$	$e_1, 10^{-3}$	$e_2, 10^{-3}$	$a - c$, км	$a - b$, км
10	12,6	17	14,6	10,9
20	1,56	2,08	1,81	1,35
30	0,46	0,61	0,53	0,4
40	0,19	0,26	0,23	0,17

Точное выражение для потенциала внешнего гравитационного поля трёхосного эллипсоида с главными полуосями a , b и c , плотностью ρ

$$V_g(x, y, z) = -G\pi abc \times \int_{\lambda(x,y,z)}^{\infty} \frac{\frac{x^2}{a^2+s} + \frac{y^2}{b^2+s} + \frac{z^2}{c^2+s} - 1}{R(s)} ds, \quad (8)$$

где $R(s) = [(a^2+s)(b^2+s)(c^2+s)]^{1/2}$, а эллипсоидальная координата $\lambda(x, y, z)$ определяется выражением

$$\frac{x^2}{a^2+\lambda} + \frac{y^2}{b^2+\lambda} + \frac{z^2}{c^2+\lambda} = 1. \quad (9)$$

При $\lambda = 0$ потенциал (7) переходит в (4), как и должно быть при условии непрерывности на границе — поверхности эллипсоида. При малых эксцентриситетах выражение (7) можно представить в виде суммы внешнего гравитационного потенциала шара и добавок от эллипсоидальности фигуры.

В принятой модели МО ранней Луны форма внешнего более лёгкого слоя будет определяться как внешними силами (центробежной и приливной), так и гравитационным воздействием внутреннего, более тяжёлого слоя (рис. 1).

Если пренебрегать в расчётах эллипсоидальностью внутреннего слоя, то его вклад в общий гравитационный потенциал $V_g = V_g^{(1)} + V_g^{(0)}$ можно описать более простым, чем (7), выражением

$$V_g^{(1)}(x, y, z) = \frac{G\Delta M}{r}, \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2, \\ M = M_0 + \Delta M, \quad \rho_1 = \rho_m - \rho_{\text{кора}},$$

а $V_g^{(0)}$ описывается выражением (4), где $\rho = \rho_0$ ($\rho_0 = \rho_{\text{кора}}$).

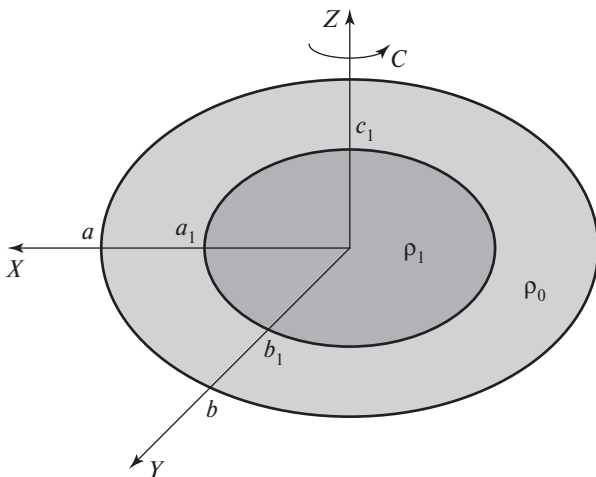


Рис. 1. Двухслойная модель ранней Луны.

С хорошим приближением внешнюю поверхность можно представить трёхосным эллипсоидом, главные полуоси которого a , b и c (или эксцентриситеты E_1 и E_2) определяются соотношениями для полного потенциала (6):

$$V(x=a, z=y=0) = V(y=b, x=z=0), \quad (10a)$$

$$V(z=c, x=y=0) = V(x=a, z=y=0) \quad (10b)$$

или

$$U_a^{(0)}(T_1, T_2) - T_1 U_b^{(0)} - \frac{\Delta M}{M_0} \frac{3}{4} \left(\frac{1}{\sqrt{T_1}} - 1 \right) = \\ = \frac{3}{2} \frac{\omega^2}{G\pi\rho_0} \sqrt{T_1 T_2} \quad (11a)$$

и

$$\frac{T_1}{T_2} U_b^{(0)} - U_c^{(0)} - \frac{\Delta M}{M_0} \frac{3}{4} \left(\frac{1}{\sqrt{T_2}} - \frac{1}{\sqrt{T_1}} \right) \frac{1}{T_2} = \\ = \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{G\pi\rho_0} \sqrt{T_1 T_2} \quad (11b)$$

соответственно. Их сравнение позволяет устранить неизвестный фактор $\omega(d)$ и определить неоднородность ранней Луны: $\Delta M/M_0 = 0,711$, принимая $E_1 = 1,196 \cdot 10^{-3}$ и $E_2 = 2,495 \cdot 10^{-3}$ по наблюдаемой величине реликтового приливного выступа. С учётом найденной величины неоднородности с помощью соотношения (11a) можно определить $d = D/R_E \approx 31,5$. Учитывая, что $\Delta M/M_0 = M/M_0 - 1$,

$$\rho_0 = \frac{\rho_B}{1 + \Delta M/M_0}, \quad \rho_0 = \rho_{\text{кора}} = 1956 \text{ кг/м}^3. \quad (12)$$

При этом a_1 , b_1 и c_1 — главные полуоси внутреннего эллипсоида, $\epsilon_1 = 1 - t_1$, $\epsilon_2 = 1 - t_2$ — его экваториальный и полярный эксцентриситеты соответственно, $t_1 = (b_1/a_1)^2$, $t_2 = (c_1/a_1)^2$ можно определить с помощью $V = \text{const}$ на поверхности внутреннего слоя и выражений (4) для гравитационных потенциалов однородных эллипсоидов $V_g^{(0)}$ и $V_g^{(1)}$. В линейном приближении для малых эксцентриситетов это даёт следующие соотношения:

$$\left(\frac{4}{15}k + \frac{2}{3} \right) \epsilon_1 - \frac{2}{5} E_1 \approx 2 \frac{\rho_E}{\rho_0} \frac{1}{d^3}, \quad (13a)$$

$$\left(\frac{4}{15}k + \frac{2}{3} \right) (\epsilon_2 - \epsilon_1) - \frac{2}{5} (E_2 - E_1) \approx \frac{2 \rho_E}{3 \rho_0} \frac{1}{d^3}, \quad (13b)$$

где $k = \frac{\rho_B - \rho_0}{\rho_0} \left(\frac{a}{a_1} \right)^3$. Данный параметр можно оценить с помощью баланса масс: $M = M_0 + \Delta M$, $\Delta M = 3,054 \cdot 10^{22}$ кг с общей массой Луны $M = 7,346 \cdot 10^{22}$ кг, $\Delta M \approx \left(\frac{4}{3} \right) \pi (\rho_m - \rho_{\text{кора}}) a_1^3$; причём

он будет зависеть от предполагаемой плотности мантии. Например, для мантии с плотностью $\rho_m = 3700 \text{ кг/м}^3$, $a_1 = 1650 \text{ км}$, т.е. толщина лёгкой коры будет составлять 87 км , а $\varepsilon_1 \approx 0,76 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon_2 \approx 1,427 \cdot 10^{-3}$.

Соотношение $|C_{20}|/2C_{22}$ для двух вложенных эллипсоидов определяется отношением главных моментов инерции

$$\frac{|C_{20}|}{2C_{22}} = \frac{(2E_2 - E_1) + \left(\frac{a_1}{a}\right)^2 \frac{\Delta M}{M_0} (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{E_1 + \left(\frac{a_1}{a}\right)^2 \frac{\Delta M}{M_0} \varepsilon_1} \quad (14)$$

и с помощью соотношений (11) и (13) может быть выражено через параметр $p = a/a_1$ в общем виде (рис. 2).

При сделанных выше оценках неоднородности мы получаем большее совпадение с наблюдаемыми данными для “реликтового” приливного выступа, чем для однородной модели:

$$|C_{20}|/C_{22} = 6,11. \quad (15)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ГЕОХИ РАН было экспериментально установлено, что весовые проценты газов могут быть растворены в магме [9] при давлениях и температуре, характерных для лунной коры. Большая часть летучих была дегазирована МО ранней Луны, но удерживаемой части оказалось достаточно, чтобы поддерживать пониженную плотность верхнего слоя будущей коры вплоть до её затвердевания. Анализ

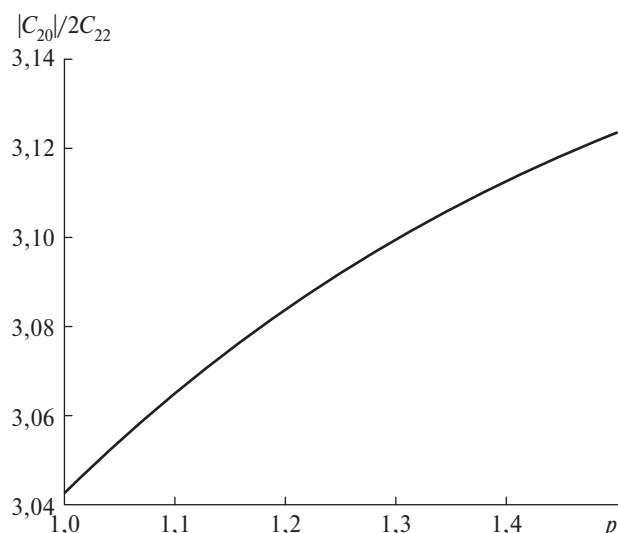


Рис. 2. Зависимость $|C_{20}|/2C_{22}$ от параметра $p = a/a_1$ при $d = D/R_E = 31,5$ и плотности верхнего слоя $\sim 2000 \text{ кг/м}^3$.

гравиметрии высокого разрешения GRAIL показал, что средняя плотность континентов Луны $2550 \pm 250 \text{ кг/м}^3$ [10], а толщина составляет $35\text{--}40 \text{ км}$. Отклонение от ранее принятой величины плотности ($\sim 2800 \text{ кг/м}^3$) объяснялось значительной пористостью (до $\sim 12\%$) и развитой системой трещин в лунной коре, вызванной интенсивной метеоритной бомбардировкой. Рассмотренная нами простая двухслойная модель ранней Луны достаточно хорошо воспроизводит основные наблюдаемые характеристики “реликтового” приливного выступа в предположении, что ранняя Луна находилась на расстоянии $d = D/R_E \approx 31,5$ и плотность верхнего слоя МО составляла 1956 кг/м^3 до затвердевания. Позже, когда остатки летучих были дегазированы, кора Луны, очевидно, уплотнилась и приобрела современные значения.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 17–17–01279).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Williams J.G., et al. Lunar Interior Properties from the GRAIL Mission // J. Geophys. Res. Planets. 2014. V. 119. P. 1546–1578.
2. Жарков В.Н., Паньков В.Л., Калачников А.А., Оснач А.И. Введение в физику Луны. М.: Наука, 1969. 312 с.
3. Mazarico E. Detection of the Lunar Body Tide by the Lunar Orbiter Laser Altimeter // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 2282–2288.
4. Zhong S., Zuber M.T. Long-Wavelength Topographic Relaxation for Selfgravitating Planets and Implications for the Time-dependent Compensation of Surface Topography // J. Geophys. Res. 2000. V. 105 (E2). P. 4153–4164.
5. Wahr J. Modeling Stresses on Satellites due to Non-synchronous Rotation and Orbital Eccentricity Using Gravitational Potential Theory // Icarus. 2009. V. 200. № 1. P. 188–206.
6. Мельхиор П. Физика и динамика планет. М.: Мир, 1976. Ч. 2. 483 с.
7. Назаров М.А., Тарасов Л.С., Шевалевский И.Д. Минералогия материкового реголита (“Луна-20”). В кн.: Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. С. 226–266.
8. Grange M.L. Complex Magmatic and Impact History Prior to 4.1 Ga Recorded in Zircon from Apollo 17 South Massif Aphanitic Breccia 73235 // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 2213–2232.
9. Кадик А.А., Луканин О.А. Дегазация верхней мантии при плавлении. М.: Наука, 1986. 95 с.
10. Wieczorek M.A. The Crust of the Moon as Seen by GRAIL // Science. 2013. V. 339. P. 671–675.

FEATURES OF THE FOSSIL TIDAL BULGE FORMATION FOR THE EARLY MOON

S. A. Voropaev, A. Yu. Dnestrovskii, Academician of the RAS M. Ya. Marov

Received July 27, 2018

The limitations imposed on the orbit and the distribution of the density of the early Moon by present-day measurements of its fossil tidal bulge are studied. A semi-analytical method has been developed for calculating gravitational potentials, which makes it possible to investigate the equi-potential surfaces of a self gravitating inhomogeneous mass in an external field. Universal expressions are obtained for the two-layer mantle–crust model of the early Moon, which makes it possible to make general estimates of the density of the upper crust and semi-axes of its orbit in the case of tidal capture by the Earth.

Keywords: Moon, Earth, orbital evolution, tidal interaction, crust-mantle differentiation.

УДК 543.37

ДИНАМИКА РАСТВОРЁННОГО НЕОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ПОТОКОВ CO_2 МЕЖДУ ВОДОЙ И АТМОСФЕРОЙ В ГЛАВНОМ РУСЛЕ РЕКИ ОБЬ

И. И. Пипко^{1,*}, С. П. Пугач¹, О. Г. Савичев², И. А. Репина³, Н. Е. Шахова²,
Ю. А. Моисеева², К. В. Барсков³, академик РАН В. И. Сергиенко⁴,
член-корреспондент РАН И. П. Семилетов^{1,2}

Поступило 27.07.2018 г.

Анализируются результаты исследований динамики параметров карбонатной системы, выполненных в среднем и нижнем течении реки Обь в июле 2016 г. В распределении карбонатных характеристик речных вод обнаружен устойчивый широтный тренд, определяемый ландшафтно-геохимическими условиями дренажного бассейна и распространением многолетнемерзлых пород. Представлены первые натурные данные, характеризующие величину и направление потоков CO_2 в системе речная вода—атмосфера в этой зоне. Показано, что воды среднего и нижнего течений реки многократно пересыщены CO_2 относительно его содержания в атмосфере, среднесуточные величины эвазии достигают $625,9 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ при среднем значении $102,1 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Установлено, что воды реки Обь на исследуемом участке являются значимым источником CO_2 в атмосферу; согласно консервативным оценкам, в июле суммарный поток составил $2 \cdot 10^{11}$ г углерода в форме CO_2 .

Ключевые слова: арктические реки, карбонатная система, парниковые газы, потоки CO_2 , мерзлота, климат.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846691-697>

Крупные реки интегрируют биогеохимический сигнал с обширного водосбора, часто охватывающего несколько климатических зон, и являются связующим звеном между наземными и морскими экосистемами, а также атмосферой. Реки, как и все внутренние водоёмы, получают большое количество наземного углерода; в результате их воды характеризуются в целом гетеротрофным метаболизмом и пересыщены углекислым газом CO_2 относительно его содержания в атмосфере. Но из-за сравнительно небольшой площади, занимаемой реками на поверхности Земли, они редко рассматриваются в качестве потенциально важного количественного компонента углеродного цикла в глобальной или региональной шкале. Однако последние исследования показали, что эмиссия углекислого газа из наземных водных экосистем играет важную роль в углеродном цикле [1], а геохимический сигнал крупнейших си-

бирских рек прослеживается на шельфе/склоне Северного Ледовитого океана [2–4].

Существующие связи в цикле углерода в системе суша—вода—атмосфера контролируются биогеохимическими факторами, которые определяют химический состав вод, а также интенсивность потока CO_2 в атмосферу. Сибирские арктические реки представляют особый интерес, так как они дренируют территории, где находятся огромные запасы древнего и современного лабильного органического вещества (ОВ). Быстрые изменения климата и гидрологического режима в арктическом регионе могут привести к вовлечению гигантского пула углерода, ранее законсервированного в мерзлоте, в современный биогеохимический цикл и поступлению его в органической и неорганической формах в водную среду/атмосферу. Основная часть гидрохимических исследований в водах сибирских арктических рек связана с изучением пространственной динамики и латерального транспорта органического и неорганического углерода [2, 5–8], и лишь в одной работе оцениваются процессы обмена CO_2 в системе речная вода—атмосфера (река Колыма, [9]).

Объектом наших исследований является река Обь — 3-я среди крупнейших арктических рек и 13-я в мире по объёму годового стока (427 км^3) с водосбором общей площадью $2,99 \text{ млн км}^2$. Обь также

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва

⁴ Президиум Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

*E-mail: irina@poi.dvo.ru

играет важную роль и в социально-экономическом аспекте — плотность населения в её бассейне значительно превосходит этот показатель для любой другой арктической реки (<https://arcticgreatrivers.org/rivers/>). Среди территорий, характеризующихся наличием многолетнемёрзлых пород (ММП), водосбор реки Обь наиболее подвержен влиянию климатических изменений благодаря ряду факторов: преобладанию в бассейне реки прерывистой, массивно-островной и островной вечной мерзлоты (в отличие от сибирских рек, расположенных восточнее, где доминирует сплошная мерзлота), равнинному рельефу, развитию термокарста и наличию больших запасов древнего и современного органического углерода в виде частично замороженных торфяных отложений [7].

Реку Обь можно отнести к одной из наиболее исследованных в геохимическом аспекте сибирских арктических рек [5, 7, 8], однако динамика карбонатных параметров изучалась лишь на ограниченных участках главного русла, а оценки потоков CO_2 между речными водами и атмосферой ранее не выполнялись.

Цель настоящей работы — исследовать пространственную изменчивость содержания неорганических форм углерода в среднем и нижнем течениях реки Обь, а также выполнить первую количественную оценку потоков CO_2 между речными водами и атмосферой.

Работы выполнялись в июле 2016 г. вдоль 2671-километрового широтного разреза в главном русле реки Обь по маршруту Салехард—Томск на борту теплохода “ОМ-341” (рис. 1). На 45 комплексных станциях проводилось вертикальное зондирование с помощью профилографа Seabird 19plus, оснащённого датчиками температуры T , электропроводности, растворённого кислорода, флуоресценции, а также мутности. С поверхностного и придонного горизонтов были отобраны пробы речной воды для определения гидрохимических параметров — общей щёлочности TA , pH, растворённого кислорода, окрашенной фракции растворённого органического вещества и хлорофилла “а”. Эти характеристики измерялись в судовой лаборатории, и методы их определения приведены в [2–4, 6]. Концентрации форм растворённого неорганического углерода (CO_2 , HCO_3^- и CO_3^{2-}) и величины $p\text{CO}_2$ парциального давления CO_2 были рассчитаны из измеренных значений pH и TA с использованием алгоритма расчёта параметров карбонатной системы пресных вод [10]. Предварительно был оценён вклад органической щёлочности OA в величину TA согласно методу, пред-

ложенному в [11]. OA в речных водах составляла в среднем 6% от TA , а вклад силикатной щёлочности был незначительным (ниже ошибки определения TA). Скорость и направление ветра регистрировали на судне при помощи метеостанции AIRMAR; концентрация CO_2 в воздухе измерялась газовым анализатором открытого типа LICOR7500. Величины потока CO_2 между водой и атмосферой (F_{CO_2}) были рассчитаны с использованием параметризации Ваннинкова [12]; ранее было показано, что полученные для морских вод уравнения, связывающие скорость ветра и скорость газопереноса k , позволяют оценить k в реках высокого порядка с большой точностью [13]. Отметим, что идентичность методов, используемых в исследованиях речных и шельфовых вод, позволяет проводить общий анализ закономерностей трансформации углерода в арктической системе суша—шельф.

В распределении форм неорганического углерода в поверхностных водах главного русла реки Обь были обнаружены тенденции уменьшения концентраций растворённого CO_2 (а также $p\text{CO}_2$) и увеличения содержания карбонат- и бикарбонат-ионов с севера на юг исследуемого региона. Величины pH также характеризовались значительной пространственной изменчивостью (рис. 2).

В предшествующих исследованиях было показано, что в ряду факторов, обуславливающих динамику гидрохимических элементов в водах рек Западно-Сибирской низменности (площадь водосбора—сезонность—широта), именно широта является определяющим [5, 7, 8]. Одной из важнейших причин существования устойчивой связи гидрохимических параметров рек разного порядка с широтным положением является наличие или отсутствие ММП в дренажном бассейне [5, 7]. Известно, что многолетняя мерзлота, существующая в бассейне западно-сибирских рек, является главным образом прерывистой или островной; при этом южная часть бассейна “безмерзлотная”, а сплошная мерзлота существует только на крайнем севере вблизи морского побережья (рис. 1). Такой характер распространения ММП (сокращение площади с севера на юг до полного исчезновения) определяет в первую очередь изменение режима питания на протяжении реки Обь: увеличение в южном направлении вклада грунтового питания и соответственно притока подземных вод с повышенной минерализацией. Важное значение для формирования гидрохимического режима Оби имеет существующая в дренажном бассейне реки крупнейшая в мире система торфяных болот, с водами которых в речную сеть поступает

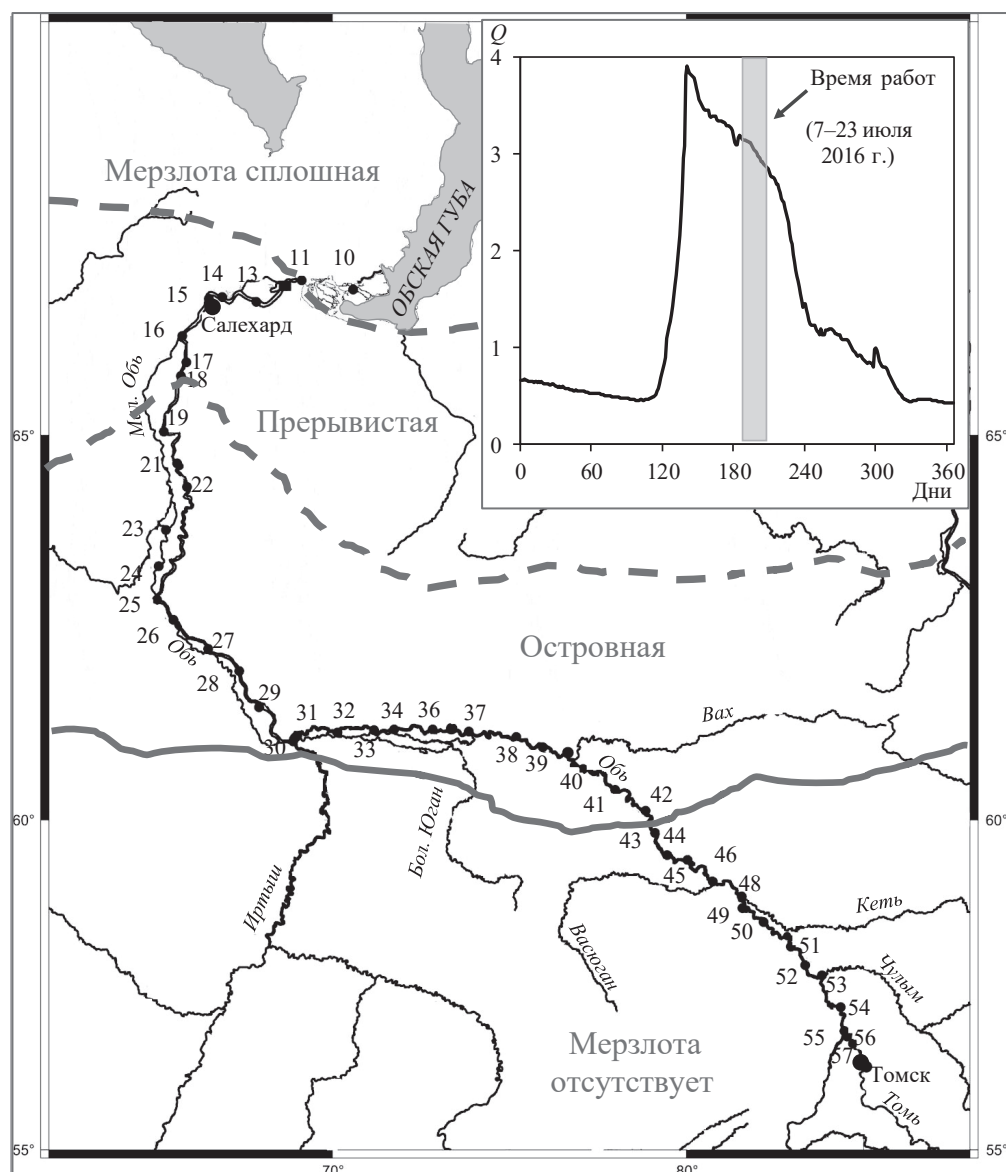


Рис. 1. Район работ, положение комплексных станций, границы распространения многолетнемерзлых пород и гидрограф реки Обь (Q — расход воды, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^4$).

большое количество органических веществ и продуктов их трансформации.

Значения концентраций изучаемых карбонатных параметров вод в зоне распространения многолетней мерзлоты и безмерзлотной зоне статистически значимо различались (табл. 1). Наиболее минерализованные воды с концентрацией ТА, достигающей $2458 \text{ мкмоль} \cdot \text{кг}^{-1}$, были обнаружены на юге района исследований, минимальные — в северной части (рис. 2). Динамика распределения ОА демонстрировала противоположную тенденцию (рис. 2): её значения снижались на юг с минимальными концентрациями в реке Томь — крупном притоке Оби, основная часть стока которого формируется в горных районах Кузнецкого Алатау и Горной Шории.

Важно также отметить, что экспедиционные работы были проведены в промежуток времени, соответствующий в нижнем течении реки Обь половодью, а на юге региона — летней межени, что также отразилось на формировании гидрохимического режима вод на разных участках реки.

Воды среднего и нижнего течений реки Обь, дренирующие огромные заболоченные площади, были в значительной степени пересыщены CO₂ относительно атмосферы (рис. 2, 3) в результате интенсивного поступления в русло реки кислых почвенных вод, обогащённых CO₂ и ОВ. Обнаруженное распределение величин $p\text{CO}_2$ указывало на преимущественно гетеротрофный метаболизм изучаемой водной экосистемы (рис. 3). Исключением были авто-

Таблица 1. Средние величины карбонатных характеристик поверхностных вод главного русла реки Обь в зонах распространения и отсутствия многолетней мерзлоты в дренажном бассейне

Зона	TA	pH	DIC	CO ₂	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	pCO ₂
Мерзлотная	1166,0 ± 196,7	7,57 ± 0,17	1165,4 ± 215,2	84,0 ± 30,1	1079,8 ± 210,1	1,7 ± 0,8	2324,2 ± 814,4
Безмерзлотная	1765,7 ± 207,0	8,17 ± 0,40	1765,7 ± 209,4	37,7 ± 24,5	1707,7 ± 209,4	20,3 ± 28,1	1054,9 ± 691,4

Примечание. Все концентрации приведены в мкмоль · кг⁻¹, величины pH — в единицах pH в шкале NSB, pCO₂ — в мкاتم.

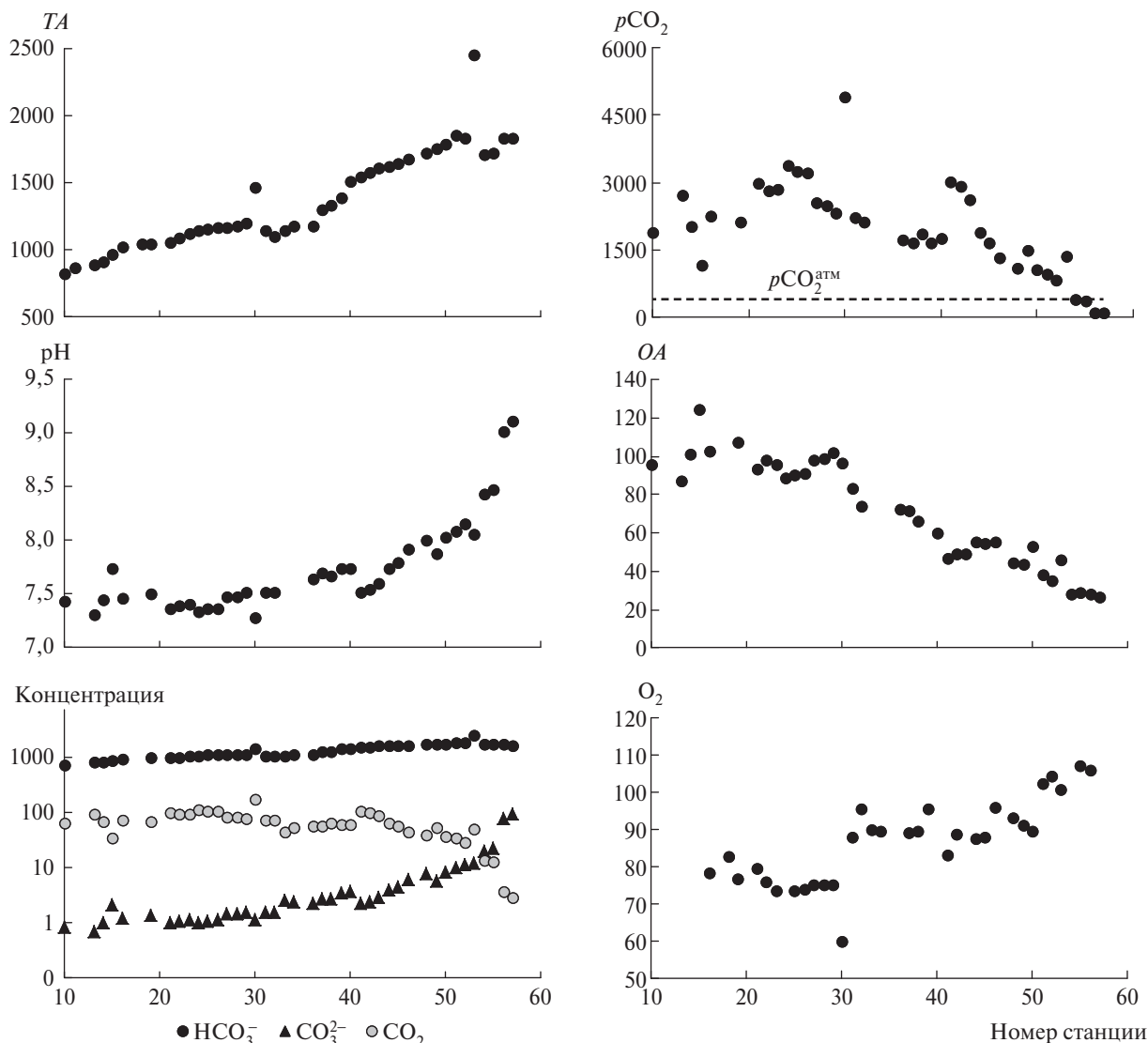


Рис. 2. Пространственное распределение величин общей щёлочности TA, мкмоль · кг⁻¹, pH, концентраций карбонат CO₃²⁻- и бикарбонат HCO₃⁻-ионов, растворённого CO₂, мкмоль · кг⁻¹, парциального давления CO₂, pCO₂, мкاتم, величин органической щёлочности OA, мкмоль · кг⁻¹, и степени насыщения кислородом O₂, %, в поверхностных водах реки Обь и нижнего течения реки Томь.

трофные воды реки Томь, где величины pCO₂ были в несколько раз ниже атмосферных значений (рис. 2, 3). Об интенсивно протекающих в этих водах процессах фотосинтеза свидетельствовало и значительное пересыщение кислородом (рис. 2), а также двукратное увеличение концентраций хлорофилла "а" относительно нижнего и среднего течений реки Обь. Термический фактор не играл определя-

ющей роли в пространственном распределении величин pCO₂ в отличие от большой амплитуды вариаций pCO₂ (рис. 2), температура поверхностных вод изменялась в узком диапазоне (20,9–24,4 °C), и корреляционная связь pCO₂–T была малозначимой ($r = -0,28$). При общей тенденции снижения pCO₂ с севера на юг отклонения его величин, как и других гидрохимических параметров, от обнаруженного

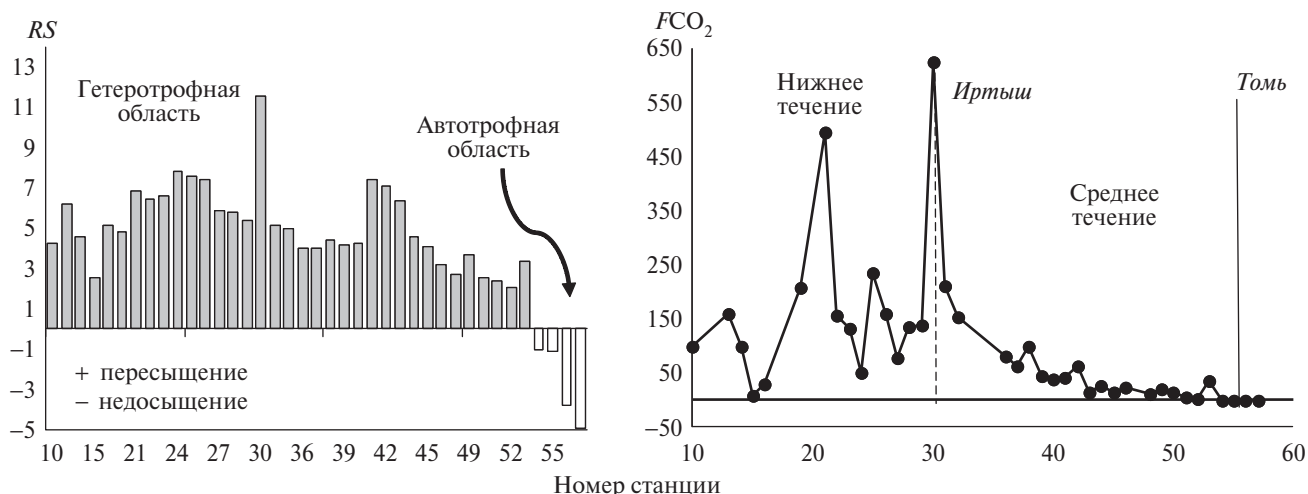


Рис. 3. Распределение величин относительного насыщения поверхностных вод углекислым газом RS и потоков CO_2 между водой и атмосферой F_{CO_2} , ммоль $\cdot$ м⁻² $\cdot$ сут⁻¹. $RS = pCO_2^B / pCO_2^{atm}$ в гетеротрофной зоне и $RS = -pCO_2^B / pCO_2^{atm}$ в автотрофной, где pCO_2^B и pCO_2^{atm} — парциальное давление CO_2 в поверхностной воде и атмосфере соответственно.

тренда наблюдались в местах впадения в реку крупных притоков (рис. 1, 2). Наибольшие флуктуации были отмечены в месте слияния рек Обь и Иртыш (ст. 30, рис. 2). Воды реки Иртыш, находящиеся под значительным антропогенным влиянием, характеризовались повышенным содержанием растворённого ОВ, взвешенных веществ, растворённого CO_2 и низким насыщением кислородом; фронтальную зону между водами этих рек можно было наблюдать визуально.

Потоки CO_2 в системе вода—атмосфера рассчитывали с использованием квадратичной параметризации, связывающей среднечасовую скорость ветра и скорость газопереноса [12]. Наибольшие потоки были обнаружены в нижнем течении реки, что определялось как максимальным для района исследова-

ний (более чем на порядок) пересыщением речных вод CO_2 относительно его содержания в атмосфере, так и высокими скоростями ветра (рис. 3, табл. 2). Средняя величина потока CO_2 в атмосферу на этом участке реки достигала 176,3 ммоль $\cdot$ м⁻² $\cdot$ сут⁻¹ (табл. 2). В среднем течении реки поток CO_2 также был направлен в атмосферу (рис. 3, табл. 2). Поглощение CO_2 речными водами наблюдалось лишь на юге района исследований (рис. 2, 3). Но несмотря на почти пятикратное недосыщение поверхностных вод CO_2 , поток из атмосферы здесь был незначительным, что определялось низкими скоростями ветра (табл. 2). В целом воды главного русла реки были значимым источником CO_2 в атмосферу: средний поток CO_2 из обских вод составил 102,1 ммоль $\times$ м⁻² $\cdot$ сут⁻¹. Для сравнения: среднесуточный поток CO_2 из всех рек мира составляет около 359 ммоль $\times$ м⁻² $\cdot$ сут⁻¹, из крупнейших рек — около 245 [14], а из вод главного русла реки Колымы в период летней межени — 41,7 ммоль $\cdot$ м⁻² $\cdot$ сут⁻¹ [9]. Было рассчитано суммарное поступление углерода в атмосферу из вод реки Обь в течение летнего месяца: по минимальным оценкам в июле 2016 г. из главного русла реки Обь в атмосферу поступило приблизительно $2 \cdot 10^{11}$ г углерода в форме CO_2 , что свидетельствует о значимом вкладе обских вод в величину годовой эвазии CO_2 из наземных пресноводных экосистем [1, 14]. Учитывая, что в пик половодья речные воды заливают пойму (шириной до 20–30 км), только за счёт увеличения площади водной поверхности величина среднечасового потока может возрасти на порядок.

Значительная часть крупнейшего в мире заболоченного бассейна реки Обь дренируется большим

Таблица 2. Распределение средних величин потоков CO_2 в системе вода—атмосфера F_{CO_2} , разницы парциального давления pCO_2 между водой и атмосферой ΔpCO_2 , среднечасовой скорости ветра U и скорости газопереноса k в главном русле реки Обь и нижнем течении реки Томь

Район	F_{CO_2} , ммоль $\cdot$ м ⁻² $\cdot$ сут ⁻¹	ΔpCO_2 , мклатм	U , м $\cdot$ с ⁻¹	k , см $\cdot$ ч ⁻¹
Нижнее течение $n = 16$	$176,3 \pm 164,0$ 9,0–625,9	$2068,8 \pm 793,7$ 610,2–4222,4	$4,9 \pm 1,7$ 2,3–8,6	$8,9 \pm 6,0$ 1,8–24,7
Среднее течение $n = 21$	$45,6 \pm 53,9$ 0–212,2	$1165,1 \pm 686,4$ –26,8–2544,5	$3,0 \pm 1,6$ 0,6–6,7	$3,9 \pm 3,8$ 0,1–14,7
Река Томь $n = 2$	–0,1 –0,2–0,0	–295,9 от –307,9 до –283,8	0,3 0,2–0,4	0,04 0,02–0,06

Примечание. Отрицательные величины соответствуют потоку CO_2 в воду.

количеством ручьёв и рек разного порядка. Известно, что интенсивность газообмена в мелких реках значительно превосходит воды главного русла (например, только 14% общего потока углерода в атмосферу в бассейне реки Юкон поступает из главного русла реки) [14]. Кроме того, наиболее значимые биогеохимические последствия деградации ММП наблюдаются в зоне распространения прерывистой мерзлоты, а концентрации CO_2 в ручьях и других водоёмах в зонах её активного таяния в 3–10 раз выше, чем в зонах стабильных торфяников [15]. Поэтому следует ожидать, что удельный (как и суммарный) поток углерода в форме CO_2 в атмосферу из рек Обского бассейна будет значительно превышать полученные нами величины. Важнейшей задачей для достоверной оценки роли сибирских рек в балансе атмосферного CO_2 является продолжение детальных сезонных исследований газообмена в главном русле Оби в сравнении с реками Восточной Сибири, например рекой Лена [2, 6]. Не менее актуальным представляется и изучение рек более мелкого порядка, которые являются “горячими точками” в планетарном потоке CO_2 в атмосферу [1, 9, 14].

В результате выполненного исследования обнаружен широтный тренд в пространственном распределении карбонатных характеристик вод в главном русле реки Обь, определяемый ландшафтно-геохимическими условиями дренажного бассейна и степенью деградации ММП. Получены первые натурные данные, характеризующие величину и направление потоков CO_2 в системе вода—атмосфера в реке Обь. Показано, что гетеротрофные воды нижнего и среднего течений реки Обь многократно пересыщены CO_2 и являются значимым поставщиком углерода в атмосферу в региональном и глобальном масштабах. С точки зрения перспектив изменения климата, приводящих к значимым изменениям цикла углерода в бассейнах северных рек, наши результаты также устанавливают базовый уровень, достаточно полно характеризующий текущее состояние карбонатной системы вод реки Обь и позволяющий проводить сравнения с материалами дальнейших исследований.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (грант № 14.Z50.31.0012), экспедиционные исследования проводили при поддержке РНФ (грант № 15–17–20032), аналитические исследования выполняли на средства гранта РФФИ (грант № 18–05–00559).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raymond P.A., Hartmann J., Lauerwald R., Sobek S., McDonald C., Hoover M., Butman D., Striegl R., Mayorga E., Humborg C., Kortelainen P., Dürr H., Meybeck M., Ciais P., Guth P. // *Nature*. 2013. V. 503. № 7476. P. 355–359. DOI: 10.1038/nature12760.
2. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Dudarev O.V., Pugach S.P., Charkin A.N., McRoy C.P., Kosmach D., Gustafsson O. // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 2407–2426. DOI: 10.5194/bg-8-2407-2011.
3. Pipko I.I., Pugach S.P., Semiletov I.P., et al. // *Ocean Sci.* 2017. V. 13. P. 997–1016.
4. Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson Ö., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. // *Ocean Sci.* 2018. V. 14. P. 87–103.
5. Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. // *Water Resources*. 2007. V. 43. W03406. DOI: 10.1029/2006WR004902.
6. Пунко И.И., Пугач С.П., Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н. // *Геохимия*. 2010. Т. 48. № 11. С. 1206–1213.
7. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S., Shirokova L.S., Krickov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtsov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. // *Biogeosciences*. 2015. V. 12. P. 6301–6320.
8. Савичев О.Г., Мазуров А.К., Пунко И.И., Сергуенко В.И., Семилетов И.П. // *ДАН*. 2016. Т. 466. № 2. С. 202–206.
9. Denfeld B.A., Frey K.E., Sobczak W.V., Mann P.J., Holmes R.M. // *Polar Res*. 2013. V. 32. 19704.
10. Lewis E., Wallace D.W.R. Program Developed for CO_2 System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge (Tennessee). Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. 1998.
11. Тищенко П.Я., Михайлик Т.А., Павлова Г.Ю., Тищенко П.П., Колтунов А.М., Zhang Jing // *Геохимия*. 2017. № 3. С. 236–248.
12. Wanninkhof R. // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7373–7382.
13. Ho D.T., Schlosser P., Ortonet P.M. // *Estuaries and Coasts*. 2011. V. 34. P. 1103–1116. DOI: 10.1007/s12237-011-9396-4.
14. Lauerwald R., Laruelle G.G., Hartmann J., Ciais P., Regnier P.A.G. // *Global Biogeochem. Cycles*. 2015. V. 29. P. 534–554. DOI: 10.1002/2014GB004941.
15. Loiko S.V., Pokrovskij O.S., Raudina T.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Shirokova L.S., Vorob'ev S.N. // *Chem. Geol.* 2017. V. 471. P. 153–165.

DYNAMICS OF DISSOLVED INORGANIC CARBON AND CO₂ FLUXES BETWEEN WATER AND ATMOSPHERE IN THE MAIN CHANNEL OF THE OB RIVER

I. I. Pipko, S. P. Pugach, O. G. Savichev, I. A. Repina, N. E. Shakhova,
Y. A. Moiseeva, K. V. Barskov, Academician of the RAS V. I. Sergienko,
Corresponding Member of the RAS I. P. Semiletov

Received July 27, 2018

The results of investigation of the carbonate system parameters dynamics in the middle and lower reaches of the Ob River in July 2016 were analyzed. The distributions of the carbonate characteristics of the river waters were found to follow a steady latitudinal trend determined by the landscape-geochemical conditions of the drainage basin and by the permafrost distribution. The first field data on the magnitude and direction of the CO₂ fluxes in the river water–atmosphere system in this region were presented. It was shown that the waters in the middle and lower reaches of the river are multiply supersaturated with CO₂ with respect to its atmospheric content, and the daily average evasion reaches 625,9 mmol m⁻² day⁻¹ at an average value of 102,1 mmol m⁻² day⁻¹. It was determined that the waters of the Ob River in the studied reaches are a significant CO₂ source to the atmosphere; according to conservative estimates, the total flux in July was $2 \cdot 10^{11}$ g of carbon in the form of CO₂.

Keywords: Arctic rivers, carbonate system, greenhouse gases, CO₂ fluxes, permafrost, climate.

УДК 547.814+539.261

НОВЫЕ ФОТОХРОМНЫЕ СОЛЕВЫЕ СПИРОПИРАНЫ ИНДОЛИНОВОГО РЯДА

А. Д. Пугачев^{1,*}, М. Б. Лукьянова¹, В. В. Ткачев², Б. С. Лукьянов^{1,3},
Н. И. Макарова¹, Г. В. Шилов², И. А. Ростовцева¹, Л. С. Лапшина³,
академик РАН В. И. Минкин¹, академик РАН С. М. Алдошин²

Поступило 05.07.2018 г.

Представлены синтез, исследование структуры и фотохромных свойств новых солевых спиропиранов индолиновой серии, содержащих в качестве заместителя в положении 6' 2Н-хроменовой части атомы хлора и брома. Строение полученных соединений подтверждено данными ЯМР ¹Н-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. Соединения являются фотохромными; длинноволновый максимум полосы поглощения их открытой фотоиндуцированной формы имеет значительный гипсохромный сдвиг, а время жизни существенно возрастает по сравнению с фторным аналогом.

Ключевые слова: спиропиран, солевые фрагменты, ЯМР-спектроскопия, фотохромизм, рентгеноструктурный анализ, батохромный сдвиг.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846698-702>

Фотохромные соединения, которыми являются спиропираны, находят широкое применение при создании гибридных материалов [1–5]. Поскольку современные записывающие и запоминающие устройства функционируют в области 650–1000 нм, желательно, чтобы максимум поглощения фотоиндуцированного изомера находился в ближнем ИК-диапазоне. Ранее было показано, что замена кислорода 2Н-хроменовой части спиропирана на серу вызывает сильный батохромный сдвиг длинноволновой полосы поглощения фотоиндуцированных форм [6]. Однако известны более простые в получении спироциклические солевые структуры с отличным от нуля поглощением в области более 650 нм для мероцианинового изомера [7]. Ранее нами были получены солевые спиропираны индолинового ряда с длинноволновым максимумом поглощения открытой формы более 700 нм [8–10]. В настоящей работе описываются синтез, структурные и спектральные характеристики, а также фотохромное поведение новых солевых спиропиранов, содержащих атомы хлора и брома в положении 6' 2Н-хроменовой части молекулы.

Синтез спиропиранов (**3a**) и (**3b**) был осуществлён по схеме 1.

Строение полученных соединений (**3**) было доказано данными элементного анализа, ИК- и ЯМР ¹Н-спектроскопии. На рис. 1 представлена структура синтезированного солевого спиропирана (**3a**) по данным РСА, содержащего хлорный заместитель, а на рис. 2 — спиропирана (**3b**).

В исследованном ранее 1,3,3-триметил-6'-фтор-8'-[(Е)-2-(1'',3'',3''-триметил-3Н-индолий-2''-ил)винил]спиро[индолино-2,2'-хромен] перхлорате (**4**), содержащем вместо атомов хлора или брома атом фтора [10] (эти три соединения изоструктурны), солевой индолиновый фрагмент в соединении (**4**) имеет плоское, а в (**3a**) и (**3b**) — неплоское строение, сумма углов при N(1) = 347,4°; (347,4)°; [348,3]° (здесь и далее значения величин приведены в последовательности **3a**, (**3b**) и [**4**] с учётом характера скобок). Реализуются двойные связи N(1'')–C(2'') = 1,332(4) Å; 1,319(3) Å; [1,324(4)] Å.

На рис. 3 приведены молекулы, совмещённые по фрагменту N(1), C(3)–C(9). Отметим, что при практически полном совмещении (**3a**) и (**3b**) (сплошные линии — максимальное различие в позициях атомов не превышает 0,1 Å) характер взаимной ориентации катионного фрагмента представлен на рис. 3 (расстояние между фенильными кольцами 0,77 Å).

В структурах реализуется слабая внутримолекулярная водородная связь O(1')...H(13') = 2,21 Å; (2,20) Å; [2,198] Å, O(1')...C(13') = 2,842 Å; (2,835) Å;

¹ Научно-исследовательский институт физической и органической химии Южного федерального университета, Ростов-на-Дону

² Институт проблем химической физики Российской Академии наук, Черноголовка Московской обл.

³ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

*E-mail: lab811@ipoc.sfedu.ru

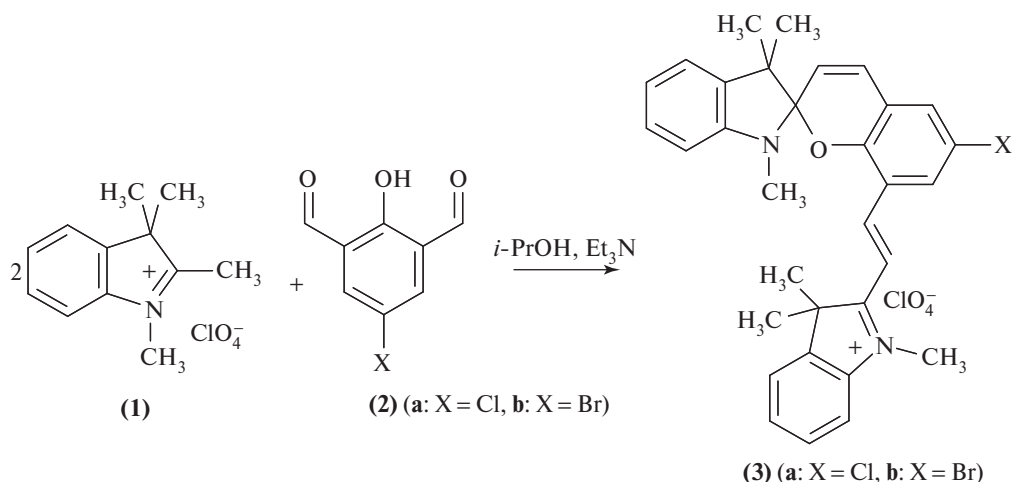


Схема 1

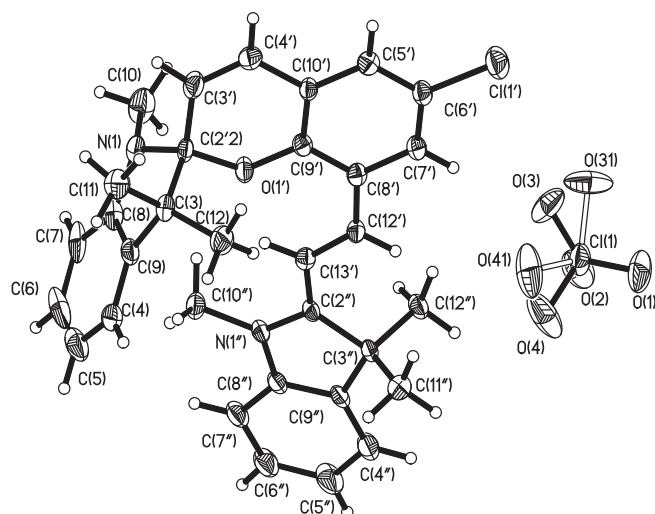


Рис. 1. Молекулярная структура соединения (3a) по данным PCA.

[2,832] Å и углом $\text{O}(1')\text{—H}(13')\text{—C}(13') = 124,1^\circ$; $(123,6)^\circ$; $[124,6]^\circ$. Шестичленный цикл бензопиранового фрагмента имеет перегиб по линии атомов $\text{O}(1')\dots\text{C}(3')$ $8,0^\circ$; $(17,5)^\circ$; $[13,1]^\circ$. Индолиновый фрагмент также неплоский, перегиб по линии $\text{N}(1)\dots\text{C}(3)$ $29,1^\circ$; $(28,6)^\circ$; $[29,0]^\circ$. В ClO_4^- -группе два атома кислорода распределены по двум позициям каждый с заселённостью 0,62 : 0,384; а два других уверенно локализируются в своих позициях, принимая участие в слабых контактах ($2,50\text{—}2,62$ Å) между парами атомов кислорода ($\text{O}(1)$, $\text{O}(2)$) и парами атомов водорода метильной группы при атомах азота катионного фрагмента.

Спектральные и фотохимические исследования для соединений (3a) и (3b) проводились в ацетонитриле. Все полученные данные приведены в табл. 1.

Соединения (3) являются фотохромными. Спиропираны в растворе практически полностью на-

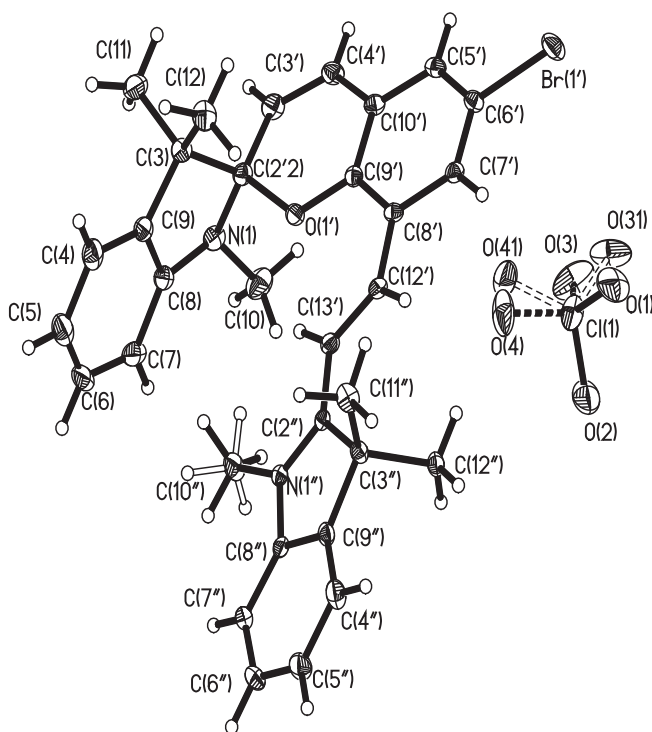
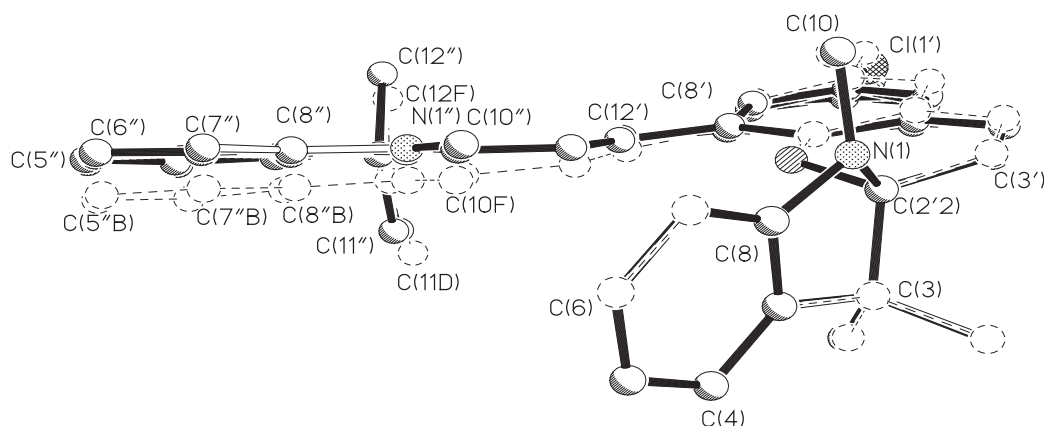


Рис. 2. Молекулярная структура соединения (3b) по данным PCA.

ходятся в циклической форме (A). Закрытая форма характеризуется полосами поглощения с максимумами при 204–205, 245–246 и 295–296 нм, а также широкой структурированной полосой в области от 300 до 500 нм с максимумом при 379–380 нм и плечом при 444–446 нм. При облучении УФ-светом наблюдается появление новой полосы в видимой области спектра с максимумом при 708–709 нм вследствие образования фотоиндуцированного мероцианинового изомера (B) (рис. 4). Введение атомов хлора и брома в положение 6' приводит к значительному гипсохромному сдвигу ($\Delta\lambda = 30\text{—}$

Рис. 3. Совмещение молекулярных структур соединений **(3a)**, **(3b)** и **(4)**.Таблица 1. Спектральные и кинетические характеристики солевых спироциклических соединений **(3a)**, **(3b)** (ацетонитрил, 293 K)

Соединение	Структура		$\lambda_{\max}$, нм ($\epsilon \cdot 10^{-3}$, $M^{-1}cm^{-1}$)	τ_B , с
(3a)		(A)	205(69,5); 245(33,2); 272*(12,2); 295(8,7); 380(29,0); 446(19,6)	189,5
		(B)	709	
(3b)		(A)	205 (57,9); 245 (28,4); 276* (9,8); 296 (7,3); 379 (23,3); 444* (15,5)	238,7
		(B)	708	

Примечание. 6'-фторзамещённый спиропиран **(4)**: $\lambda_{\max} = 738$ нм, $\tau_B = 27,8$ с [10], * — плечо.

31 нм) полосы поглощения открытой формы спиропиранов **(3a)** и **(3b)** по сравнению с ранее описанным [10] 1,3,3-триметил-6'-хлор-8'-[(E)-2-(1'',3'',3''-триметил-3Н-индолий-2''-ил)винил]спиро[индолино-2,2'-хромен] перхлоратом **(4)**.

После прекращения облучения в результате термической реакции рециклизации наблюдается восстановление спектра. Время жизни окрашенного изомера для соединений **(3a)** и **(3b)** составляет 189,5 и 238,7 с соответственно, что практически на по-

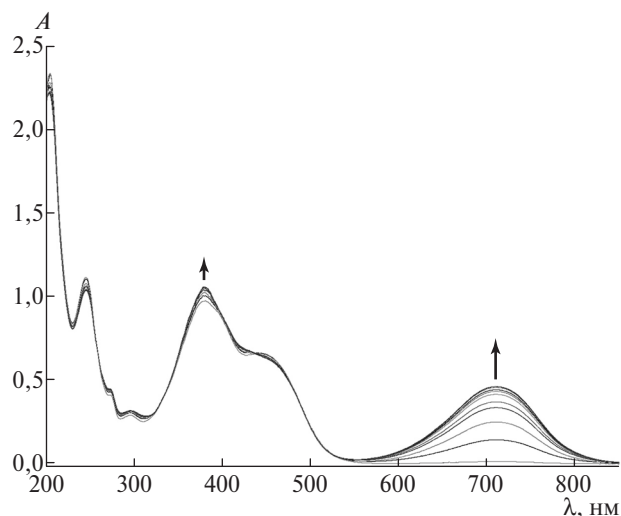


Рис. 4. Электронный спектр поглощения соединения (3a) при облучении светом с длиной волны 365 нм в ацетонитриле ($T = 293$ К, $dt = 10$ с).

рядок превосходит аналогичное значение для соединения (4) (табл. 1).

Таким образом, нами были получены и исследованы новые фотохромные солевые спиропираны индолинового ряда с максимумом поглощения фотоиндуцированного изомера более 700 нм и высоким значением времени жизни мероцианиновой формы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Спектры ЯМР регистрировали на спектрометре Bruker AVANCE-600 (600 МГц). Положение сигналов исследуемых веществ определялось по δ -шкале и проведено относительно сигналов остаточных протонов дейтерорастворителя ($\text{DMSO}-d_6$, 2,49 м.д.).

ИК-спектры соединений получены на приборе “Varian Excalibur 3100 FT-I” методом неполного внутреннего отражения. Электронные спектры поглощения до и после облучения в ацетонитрильных растворах получены на спектрофотометре “Agilent 8453” с приставкой для термостатирования образцов. Фотолиз растворов осуществляли с помощью системы “Newport”, оборудованной ртутной лампой мощностью 200 Вт с набором интерференционных светофильтров.

Элементный анализ проведён классическим методом микроанализа [11]. Температуры плавления определены на приборе Фишера—Джонса Fisher Scientific.

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Параметры элементарной ячейки кристаллов (3a) и (3b) и трёхмерный набор интенсивностей полу-

чены при температуре 150 К на автодифрактометре “Xcalibur, Eos” (MoK_α -излучение, графитовый монокроматор).

Соединение (3a). Оранжевые монокристаллы $\text{C}_{32}\text{H}_{32}\text{ClN}_2\text{O}^+\text{ClO}_4^-$ моноклинные: $a = 12,5665(15)$, $b = 13,8721(6)$, $c = 17,050(1)$ Å, $\beta = 96,744(5)^\circ$. $V = 2951,7(2)$ Å³, $M = 595,50$, $Z = 4$, $\rho(\text{выч.}) = 1,340$ см³, $\mu(\text{MoK}_\alpha) = 26442$ мм⁻¹, пр.гр. $P2_1/n$. Интенсивности 16 476 рефлексов измерены в интервале углов ($2\theta \leq 52,06^\circ$) методом ω -сканирования с монокристалла размерами $0,30 \times 0,27 \times 0,21$ мм.

Соединение (3b). Оранжевые монокристаллы $\text{C}_{32}\text{H}_{32}\text{BrN}_2\text{O}^+\text{ClO}_4^-$ моноклинные: $a = 12,6425(5)$, $b = 13,8634(9)$, $c = 16,8021(9)$ Å, $\beta = 96,870(5)^\circ$. $V = 2923,7(3)$ Å³, $M = 639,96$, $Z = 4$, $\rho(\text{выч.}) = 1,454$ г/см³, $\mu(\text{MoK}_\alpha) = 1,542$ мм⁻¹, пр.гр. $P2_1/n$. Интенсивности 17 498 рефлексов измерены в интервале углов ($2\theta \leq 52,06^\circ$) методом ω -сканирования с монокристалла размерами $0,32 \times 0,30 \times 0,30$ мм.

Проведён эмпирический учёт поглощения по процедуре Multiscan. Структуры расшифрованы прямым методом и уточнены полноматричным методом наименьших квадратов (МНК) по F^2 по программе SHELXTL в анизотропном приближении для неводородных атомов. В кристаллических структурах большинство атомов Н локализованы в синтезе Фурье разностной электронной плотности, далее координаты и изотропные тепловые параметры всех атомов Н вычислялись в процедуре МНК по модели “наездника” [12], в последнем цикле полноматричного уточнения абсолютные сдвиги всех 392 варьируемых параметров структуры были меньше 0,001σ, конечное значение фактора $R_1 = 0,073$; ($0,036$).

1,3,3-триметил-6'-хлор-8'-[(E)-2-(1'',3'',3''-триметил-3Н-индолий-2''-ил)винил]спиро[индолино-2,2'-хромен] перхлорат (3a). 0,369 г (2 ммоль) 2-гидроксид-3-формил-5-хлор-бензальдегида (2) растворяют при нагревании в 15 мл изопропилового спирта. Далее добавляют в раствор 1,094 г (4 ммоль) 1,2,3,3-тетраметил-3Н-индолия перхлората (1) и при перемешивании прикапывают 0,28 мл (один молярный эквивалент) триэтиламина. Смесь кипятят около 30 мин при перемешивании. Выпавший осадок фильтруют и перекристаллизуют из ацетонитрила. Осадок (оранжевые кристаллы) фильтруют, промывая холодным ацетонитрилом. $T_{\text{пл}} = 251$ °С (из ацетонитрила). Выход: 37,4%. Спектр ЯМР ¹H, δ , м.д. (J , Гц): 1,18 (с, 3H, *гем*-C(CH₃)₂); 1,26 (с, 3H, *гем*-C(CH₃)₂); 1,30 (с, 3H, *гем*-C(CH₃)₂); 1,33 (с, 3H, *гем*-C(CH₃)₂); 2,69 (с, 3H, N-CH₃); 3,70 (с, 3H, N⁺-CH₃); 6,09 (д, $J = 10,3$ Гц, 1H, H-3'); 6,69 (д, $J = 7,7$ Hz, 1H, H-7); 6,93 (т, $J = 7,5$ Гц, 1H, H-6); 7,16

(д, $J = 10,4$ Гц, 1Н, Н-4'); 7,19–7,23 (м, 2Н, Н-5, Н-4); 7,52 (д, $J = 16,6$ Гц, 1Н, Н-14"); 7,55–7,60 (м, 2Н, Н-5", Н-6"); 7,61 (д, $J = 2,4$ Гц, 1Н, Н-5'); 7,71–7,74 (дд, 1Н, Н-4"); 7,82–7,87 (м, 1Н, Н-7"); 7,95 (д, $J = 16,5$ Гц, 1Н, Н-13"); 8,18 (д, $J = 2,5$ Гц, 1Н, Н-7').

1,3,3-триметил-6'-бром-8'-[(Е)-2-(1'',3'',3''-триметил-3Н-индолий-2''-ил)винил]спиро[индолино-2,2'-хромен] перхлорат (3b). 0,458 г (2 ммоль) 2-гидроксиг-3-формил-5-бром-бензальдегида (**2**) растворяют при нагревании в 15 мл изопропилового спирта. Далее добавляют в раствор 1,094 г (4 ммоль) 1,2,3,3-тетраметил-3Н-индолия перхлората (**1**) и при перемешивании прикапывают 0,28 мл (один молярный эквивалент) триэтиламина. Смесь кипятят около 30 мин при перемешивании. Выпавший осадок фильтруют и перекристаллизуют из ацетонитрила. Осадок (оранжевые кристаллы) фильтруют, промывая холодным ацетонитрилом. $T_{пл} = 258$ °С (из ацетонитрила). Выход 52,8%. Спектр ЯМР ^1H , δ , м.д. (J , Гц): 1,17 (с, 3Н, гем- $\text{C}(\text{CH}_3)_2$); 1,26 (с, 3Н, гем- $\text{C}(\text{CH}_3)_2$); 1,30 (с, 3Н, гем- $\text{C}(\text{CH}_3)_2$); 1,33 (с, 3Н, гем- $\text{C}(\text{CH}_3)_2$); 2,69 (с, 3Н, N- CH_3); 3,68 (с, 3Н, N $^+$ - CH_3); 6,08 (д, $J = 10,3$ Гц, 1Н, Н-3'); 6,69 (д, $J = 7,7$ Hz, 1Н, Н-7); 6,93 (т, $J = 7,3$ Гц, 1Н, Н-6); 7,16 (д, $J = 10,4$ Гц, 1Н, Н-4'); 7,18–7,27 (м, 2Н, Н-4, Н-5); 7,51 (д, $J = 16,6$ Гц, 1Н, Н-14"); 7,55–7,62 (м, 2Н, Н-5", Н-6"); 7,70–7,76 (м, 2Н, Н-4", Н-5'); 7,80–7,86 (м, 1Н, Н-7"); 7,94 (д, $J = 16,5$ Гц, 1Н, Н-13"); 8,30 (д, $J = 2,4$ Гц, 1Н, Н-7').

Источник финансирования. Н. И. Макарова и И. А. Ростовцева благодарят за поддержку в фото-

химических исследованиях Российский фонд фундаментальных исследований (грант 16–03–01086 А); В. В. Ткачев, Г. В. Шилов и С. М. Алдошин — в рамках проведения эксперимента по рентгеноструктурному анализу по теме Государственного задания, № гос. регистрации 0089–2014–0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klajn R. // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. № 1. P. 148–184.
2. Szymanski W., Beierle J.M., Kistemaker H.A.V., et al. // Chem. Rev. 2013. V. 113. № 8. P. 6114–6178.
3. Bouas-Laurent H., Durr H. // Pure Appl. Chem. 2001. V. 73. № 4. P. 639–665.
4. Paramonov S.V., Lokshin V., Fedorova O.A. // J. Photochem. and Photobiol. C. 2011. V. 12. P. 209–236.
5. Liu C., Yang D., Jin Q., et al. // Adv. Mater. 2016. V. 28. № 44. P. 1644–1649.
6. Benniston A.C., Fortage J. // Tetrahedron Lett. 2008. V. 49. P. 4292–4295.
7. Yue Y., Huo F., Lee S., et al. // Chem. Eur. J. 2016. V. 22. P. 1239–1243.
8. Лукьянова М.Б., Ткачев В.В., Лукьянов Б.С. и др. // ЖСХ. 2018. Т. 59. № 3. С. 582–587.
9. Лукьянова М.Б., Ткачев В.В., Пугачев А.Д. и др. // ДАН. 2018. Т. 482. №. 4. С. 414–417.
10. Лукьянова М.Б., Ткачев В.В., Пугачев А.Д. и др. // ДАН. 2018. Т. 480. № 1. С. 50–54.
11. Гельман Н.Э., Терентьева Е.А., Шанина Т.М., Кипаренко Л.М. Методы количественного органического элементного анализа. М.: Химия, 1987. 296 с.
12. Sheldrick G.M. // SHELXTL Bruker AXS Inc., Madison (Wis.), 2000.

NEW PHOTOCHROMIC SALT SPIROPYRANS OF INDOLINE SERIES

A. D. Pugachev, M. B. Lukyanova, V. V. Tkachev, B. S. Lukyanov, N. I. Makarova,
G. V. Shilov, I. A. Rostovtseva, L. S. Lapshina, Academician of the RAS V. I. Minkin,
Academician of the RAS S. M. Aldoshin

Received July 5, 2018

The synthesis and study of the structure and photochromic properties of the new salt spiropyrans of the indoline series containing chlorine and bromine atoms as a substituent at the 6' position in 2H-chromene moiety are presented. The structure of the obtained compounds was confirmed by NMR ^1H spectroscopy and X-ray diffraction analysis. The compounds are photochromic; the long-wavelength maximum of the absorption band of their open photoinduced form has a significant hypsochromic shift, and the lifetime substantially increases in comparison with the fluorine analog.

Keywords: spiropyran, salt, NMR spectroscopy, photochromism, X-ray analysis, bathochromic shift.

УДК 547-313+54.057.66.017:53.06

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ КАПСУЛ ИЗ БИОСОВМЕСТИМОГО СОПОЛИМЕРА ЛАКТИДА И ГЛИКОЛИДА С ВКЛЮЧЕНИЕМ ИНТЕРФЕРОНА

И. А. Хлусов^{1,2,3,4,*}, Э. В. Киблер², В. Л. Кудрявцева²,
С. И. Твердохлебов², Е. Н. Больбасов², В. В. Ботвин¹, А. Д. Латыпов¹,
Н. Д. Газатова⁴, Л. С. Литвинова⁴, академик РАН В. М. Бузник¹,
академик РАН Е. Л. Чойнзонов^{2,5}

Поступило 12.09.2018 г.

Впервые применили метод электрораспыления для получения полимерных капсул из биорезорбируемого сополимера *dl*-лактида и гликолида, содержащих биологические молекулы из состава клеточного секрета и, в частности, интерферон альфа 2b (ИФН α -2b) человека. Полученные близкие к сферическим субмикронные капсулы исследовали методами сканирующей электронной и конфокальной лазерной микроскопии. Капсулы сохраняли структурную целостность и цитотоксическую активность ИФН α -2b в отношении опухолевых клеток. Метод электрораспыления отличается высокой технологичностью, экологической безопасностью, позволяет производить широкий спектр материалов разного состава и морфологии, перспективных для адресной доставки лекарственных препаратов и биологических молекул.

Ключевые слова: PLGA-микрокапсулы, рекомбинантный интерферон- α человека, сканирующая электронная микроскопия, конфокальная сканирующая лазерная микроскопия, биodeградация *in vitro*, цитотоксичность.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846703-708>

В настоящее время разработка инкапсулированных систем адресной доставки (ИСАД) лекарственных средств и биологических молекул в организме является прогрессивным направлением, во многом определяющим уровень развития современной регенеративной медицины, тканевой инженерии и противоопухолевой терапии. Сополимер лактида и гликолида (PLGA) является одним из наиболее перспективных биорезорбируемых полимеров для изготовления ИСАД в форме субмикронных полимерных капсул [1]. Для создания субмикронных капсул PLGA, содержащих лекарственные препараты, применяются методы одинарной или двойной эмульсии, распылительная сушка, метод послойного осаждения, которые имеют свои недостатки (высо-

кие температуры, сложность подбора состава эмульсий, высокое значение поверхностного напряжения на границе раздела поверхностей растворов, необходимость использования заряженных частиц) [2]. Метод электрораспыления позволяет формировать капсулы при низких температурах, контролировать их размер и форму при относительно простом аппаратном обеспечении технологического процесса [3].

Препараты интерферонов (альфа, бета, гамма) человека успешно используются преимущественно при опухолевых и вирусных заболеваниях. Однако вследствие быстрого их выведения из организма требуется длительное применение высоких доз интерферонов [4], часто приводящих к серьезным системным осложнениям, включая остеопороз [5]. Иммобилизация интерферона в полимерные биодеградируемые матрицы и субмикронные капсулы предполагает пролонгированное контролируемое высвобождение при его парентеральном введении [6] или внутриклеточной доставке [7]. В доступной литературе мы не обнаружили информацию об инкапсулировании интерферонов при помощи метода электрораспыления, что уменьшает потенциальное разнообразие ИСАД для клинической практики.

¹Национальный исследовательский
Томский государственный университет

²Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

³Сибирский государственный медицинский
университет, Томск

⁴Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград

⁵Томский национальный исследовательский
медицинский центр Российской Академии наук

*E-mail: khlusov63@mail.ru

Целью настоящей работы было получение методом электрораспыления субмикронных PLGA-капсул, в том числе с включением интерферона человека, исследование возможности высвобождения и биологической (противоопухолевой) активности препарата после инкапсулирования.

Сополимер молочной и гликолиевой кислоты (PLGA) получали методом ионно-координационной полимеризации с раскрытием циклов *dl*-лактида и гликолида [8, 9] в присутствии октоата олова (“Sigma-Aldrich”, США) и лаурилового спирта (“Sigma-Aldrich”) в качестве катализатора и сокатализатора соответственно при температуре 170 °С в течение 6 ч.

Молекулярную массу синтезированного PLGA определяли методом гелепроникающей хроматографии (хроматограф Agilent 1200, “Agilent Technology”, США), соотношение лактидных мономерных звеньев в полимере (Л) — методом ЯМР ¹H-спектроскопии (Bruker AVANCE 400 III HD, “Bruker Corp.”, США). Соотношение мономерных звеньев в сополимере рассчитывали по формуле (в %)

$$\omega(\text{Л}) = \frac{I_{\text{CH}}}{I_{\text{CH}} + I_{\text{CH}_2}/2} \cdot 100,$$

где I_{CH} — интегральная интенсивность ЯМР-сигнала протонов СН-групп в спектре ($5,22 \pm 0,05$ ppm), I_{CH_2} — интегральная интенсивность сигнала от СН₂-групп в спектре ($4,85 \pm 0,05$ ppm).

Остаточное содержание мономеров определяли методом газовой хроматографии (хроматограф Хроматэк Кристалл 5000, ЗАО СКБ “Хроматэк”, Россия), содержание олова — методом атомно-эмиссионной спектроскопии с микроволновой плазмой (Agilent 4100, “Agilent Technology”).

Для изготовления полимерных капсул приготовили прядильные растворы четырёх типов: первый (контрольный) — 5%-й раствор PLGA $M_r \sim 50\,000$ г/моль в ацетонитриле (CH₃CN, НПО “Реактивы ОСЧ”, Россия); второй — 5%-й раствор PLGA в CH₃CN, содержащий интерферон альфа-2b (ИФН α-2b) в концентрации $0,1 \cdot 10^6$ МЕ/г; третий — 5%-й раствор PLGA в CH₃CN с $0,5 \cdot 10^6$ МЕ/г ИФН α-2b; четвёртый — 5%-й раствор PLGA в CH₃CN с концентрацией $1 \cdot 10^6$ МЕ/г ИФН α-2b. Прядильные растворы готовили в герметичных стеклянных реакторах при температуре 6 ± 2 °С до получения однородных прозрачных растворов. В качестве источника ИФН α-2b использовали препарат для инъекций Реаферон-ЕС (ЗАО “Вектор-Медика”, Россия, $5 \cdot 10^6$ МЕ активности в 17 мг сухого вещества).

Полимерные капсулы формировали с помощью установки электрораспыления NANON-NF 101 (“MECC Co.”, Япония) при температуре 6 ± 2 °С. Для изготовления контрольных капсул использовали капилляр 27G, объёмный расход прядильного раствора $0,50 \pm 0,05$ мл/ч, напряжение 20 ± 3 кВ, расстояние от капилляра до сборочного коллектора 55 ± 5 мм. При изготовлении капсул с ИФН α-2b применяли напряжение 25 ± 3 кВ.

Морфологию капсул изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью микроскопа Vega 3 (“Tescan”, Чехия), используя нанесение на капсулы золотого напыления магнетронной распылительной системой SC7640 (“Quorum Technologies Ltd”, Великобритания). Посредством программного обеспечения ImageJ 1.38 измеряли большой (d_{max}) и малый (d_{min}) диаметры капсул на 10 цифровых изображениях при увеличении 2000×. Согласно рекомендациям стандарта ASTM F1877–16 вычисляли индекс овальности *AR* (Aspect Ratio) и показатель округлости *R* (Roundness), используя формулы

$$AR = \frac{d_{\text{max}}}{d_{\text{min}}}, \quad R = \frac{4A}{\pi d_{\text{max}}^2},$$

где *A* — площадь частицы на микрофотографии СЭМ.

Оценку эффективности загрузки ИФН α-2b в капсулы с PLGA проводили методом флуоресцентной спектроскопии (лазерный сканирующий конфокальный микроскоп ZEISS LSM 780 NLO, “Carl Zeiss”, Германия) при облучении образцов монохроматическим излучением с длиной волны 488 нм. На ИФН α-2b наносили метку изотиоцианата флуоресцеина (Fluorescein isothiocyanate, FITC, “Sigma-Aldrich”) согласно протоколу [10]. Измеряли среднюю интегральную интенсивность флуоресценции образцов в диапазоне 400–450 нм ($I_{400-450}$) и 470–520 нм ($I_{470-520}$) в 10 полях зрения размером 140×140 мкм.

Высвобождение ИФН α-2b из капсул с PLGA оценивали после их растворения в течение 3 сут при 37 °С в бесклеточной питательной среде RPMI 1640 (Gibco®, “ThermoFisher Scientific”, США), ранее использованной для культивирования Т-лимфоblastоподобных клеток человека линии Jurkat 5332 (Институт цитологии РАН, Россия). Иммуноферментный анализ проводили, используя набор Альфа-ИНТЕРФЕРОН-ИФА-БЕСТ (“Вектор Бест”, Россия) согласно протоколу производителя тест-системы на автоматическом анализаторе Lazurit (“Dy nex Technologies Inc.”, США).

Краткосрочность исследования биodeградации капсул с PLGA была обусловлена высокой пролиферативной активностью опухолевых Т-клеток Jurkat, через 3 сут требующих полной замены питательной среды. В предварительном трёхсуточном эксперименте мы установили, что Т-клетки Jurkat чувствительны к цитотоксическому действию ИФН α -2b в прямой зависимости от концентрации препарата Реаферон-ЕС (0,05; 0,25; 0,5 и 1,0 млн МЕ/мл; уравнение регрессии $y = 4,79 - 4,97x$; $r = -0,92$; $p = 0,00003$; $n = 12$).

Т-клетки Jurkat ($0,6 \cdot 10^6$ жизнеспособных клеток) культивировали 3 сут с PLGA-капсулами ($1 \cdot 10^6$ МЕ ИФН α -2b на 1 г сополимера или без ИФН α -2b) в концентрациях 0,75; 1,5; 3 мг/мл в 90% RPMI 1640 и 10% инактивированной (56 °C в течение 30 мин) сыворотки крови эмбрионов коров ("Sigma-Aldrich"). Подсчёт концентрации и жизнеспособности клеток при окраске 0,4% трипанового синего ("Invitrogen", США) осуществляли с помощью CountessTM Automated Cell Counter ("Invitrogen").

Для оценки статистической значимости различий применяли критерий U Вилкоксона—Манна—Уитни. Связь между исследуемыми показателями устанавливали методом регрессионного анализа. Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

Согласно гелипроникающей хроматографии среднeмассовая молекулярная масса синтезированного PLGA составила $50\,000 \pm 5000$ г/моль, степень полидисперсности 2,4. Синтезированный сополимер PLGA содержал $53 \pm 2\%$ звеньев dl-лактида и $47 \pm 2\%$ звеньев гликолида. Остаточное содержание мономеров и олова составило $2 \pm 1\%$ и 100 ± 20 ppm соответственно. Согласно СЭМ полимерных капсул без ИФН α -2b (рис. 1а) и капсул, загруженных ИФН α -2b (рис. 1б–г), они имели гладкую поверхность, близкую к сферической, что могло быть обусловлено высокой (более 4 мас.%) концентрацией PLGA в прядильном растворе [11]. В табл. 1 представлены средние значения большого и малого диаметров тестируемых PLGA капсул, а также средние значения индексов AR и R.

Увеличение в прядильном растворе концентрации/активности ИФН α -2b в пределах $0,1 - 1,0 \times 10^6$ МЕ/г сополимера достоверно не влияло на линейный размер и морфологию субмикронных капсул (рис. 1, табл. 1). Геометрическая форма частиц представляла собой невыраженный эллипс (индекс овальности AR на 11–26% превышал единицу) с ровными краями.

Исследование эффективности загрузки ИФН α -2b в полимерные капсулы показало наличие их

собственной флуоресценции, флуоресценции FITC-меченого ИФН α -2b в составе микрокапсул и FITC-меченого ИФН α -2b без инкапсуляции. При возбуждении монохроматическим излучением с длиной волны $\lambda = 488$ нм PLGA-микрокапсулы без ИФН α -2b флуоресцировали в диапазонах 400–450 нм (с максимумом интенсивности при $\lambda = 420$ нм) и 470–520 нм (максимум при $\lambda = 483$ нм). В этих условиях максимум интенсивности капсул с PLGA перекрывался максимумом интенсивности флуоресценции FITC при $\lambda = 488$ нм.

Для предварительной оценки эффективности инкорпорирования ИФН α -2b в микрокапсулы с PLGA мы использовали отношение интенсивности флуоресценции в диапазоне 470–520 нм ($I_{470-520}$) к таковой в диапазоне 400–450 нм ($I_{400-450}$). Введение меченого FITC ИФН α -2b в прядильный раствор в концентрациях 0,1; 0,5; и 1,0 млн МЕ/г сополимера сопровождалось увеличением отношения $I_{470-520}/I_{400-450}$ соответственно на 23, 157 и 249% по сравнению с образцом микрокапсул без ИФН α -2b (табл. 2). Таким образом, увеличение концентрации ИФН α -2b в прядильном растворе сопровождалось ростом концентрации ИФН α -2b в микрокапсулах с PLGA.

Известно всего несколько работ (например, [12, 13]), посвящённых исследованию стабильности и биологической активности ИФН α -2b, иммобилизованного в капсулы с PLGA методом двойной эмульсии с последующим выпариванием растворителя. В нашей работе иммуноферментный анализ экстрактов после трёхсуточной деградации *in vitro* микрокапсул с PLGA в упомянутых трёх концентрациях, полученных электрораспылением с ИФН α -2b в концентрации $1 \cdot 10^6$ МЕ/г сополимера, выявил линейное ($y = 21,7 + 1,61x$; $r = 0,81$; $p = 0,00001$; $n = 21$) увеличение высвобождения белка в раствор в диапазоне 23–27 пг/мл (табл. 3). Микрокапсулы PLGA–ИФН α -2b в концентрации 0,75 мг/мл оказывали антипролиферативное действие на Т-клетки Jurkat. Дальнейшее увеличение концентрации микрокапсул с PLGA, но без ИФН α -2b до 1,5–3 мг/мл способствовало их собственному цитотоксическому действию, маскирующему влияние интерферона. Тем не менее данные работы [14] позволяют предположить, что полученные микрокапсулы в дозах, вызывающих гибель чувствительных опухолевых клеток *in vitro*, будут нетоксичны для животных и человека при парентеральном назначении.

Таким образом, мы впервые использовали метод электрораспыления для получения близких к сферическим частиц субмикронных размеров, содержащих

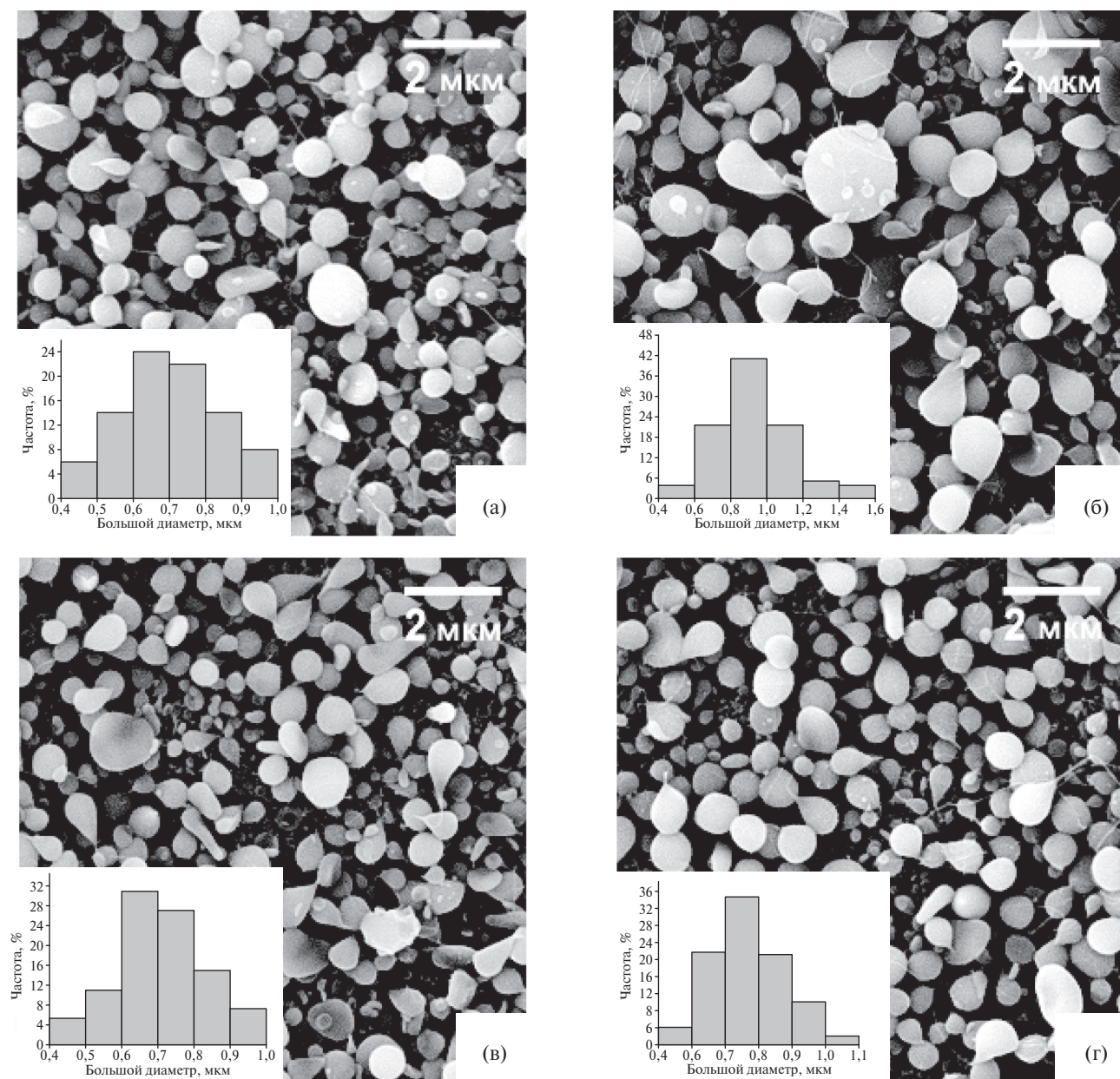


Рис. 1. Изображения СЭМ микрокапсул с PLGA, сформированных методом электрораспыления. а — контроль, б — $0,1 \cdot 10^6$ МЕ ИФН α -2b/г PLGA, в — $0,5 \cdot 10^6$ МЕ ИФН α -2b/г PLGA, г — $1,0 \cdot 10^6$ МЕ ИФН α -2b/г PLGA.

PLGA и нагруженных ИФН α -2b, с сохранением их структурной целостности и биологической активности. Подобрали режим электрораспыления, обеспечивающий стабильность процесса и позволяющий

контролировать морфологию и размеры микрокапсул. Включение компонентов клеточного секрета (на примере интерферона) может быть полезным при производстве ИСАД для регенеративной медицины.

Таблица 1. Морфометрические характеристики PLGA-микрокапсул, содержащих ИФН α -2b

Капсулы с разной активностью белка, $\times 10^6$ МЕ/г PLGA	Большой диаметр капсул, мкм	Малый диаметр капсул, мкм	AR	R
0	$0,79 \pm 0,15$	$0,64 \pm 0,14$	$1,24 \pm 0,25$	$0,88 \pm 0,51$
0,1	$0,74 \pm 0,19$	$0,67 \pm 0,15$	$1,11 \pm 0,31$	$0,83 \pm 0,67$
0,5	$0,93 \pm 0,23$	$0,74 \pm 0,19$	$1,26 \pm 0,37$	$0,63 \pm 0,41$
1,0	$0,73 \pm 0,17$	$0,62 \pm 0,10$	$1,18 \pm 0,26$	$0,84 \pm 0,50$

Примечание. Здесь и в табл. 2 $M \pm m$, $n = 10$.

Таблица 2. Интенсивность флюоресценции полимерных микрокапсул с включением FITC-меченого ИФН α -2b

Содержание FITC-меченого ИФН α -2b в прядильном растворе, МЕ на грамм PLGA	Включение FITC-меченого ИФН α -2b в капсулы по интенсивности флуоресценции		
	Интенсивность флуоресценции, $I_{400-450}$, отн. ед.	Интенсивность флуоресценции, $I_{470-520}$, отн. ед.	$I_{470-520}/I_{400-450}$
0	202 $\pm$ 37	356 $\pm$ 49	1,76 $\pm$ 0,56
0,1 $\cdot 10^6$	193 $\pm$ 28	418 $\pm$ 37	2,16 $\pm$ 0,51
0,5 $\cdot 10^6$	211 $\pm$ 23	558 $\pm$ 48	2,64 $\pm$ 0,52
1,0 $\cdot 10^6$	217 $\pm$ 53	885 $\pm$ 107	4,07 $\pm$ 1,49
Исходный препарат ИФНа-2b	21 $\pm$ 4	370 $\pm$ 51	17,62 $\pm$ 5,78

Таблица 3. Высвобождение и противоопухолевое действие микрокапсул с расчётной активностью ИФН α -2b 1 $\cdot 10^6$ МЕ/г PLGA при трёхсуточном растворении или сокультивировании с клетками-мишенями

Концентрация микрокапсул, мг/мл	Присутствие ИФН α -2b в микрокапсулах	Концентрация ИФН α -2b в среде инкубации с клетками-мишенями, пг/мл	Число жизнеспособных опухолевых клеток линии Jurkat, $\times 10^6$ /мл
0,75	+	23,07 (22,19–23,56)	2,18 (1,22–2,32)*.*
	–	–	2,71 (2,60–2,94)
1,5	+	23,95 (22,38–25,32)	1,98 (1,68–3,33)
	–	–	1,68 (1,19–2,22)*
3,0	+	26,69 (25,9–26,72)***	0,94 (0,61–0,94)*
	–	–	0,82 (0,74–0,86)*
0	–	0	3,38 (2,61–4,54)

Примечание. Ме (Q_1 – Q_3), $n = 8$, * $p < 0,05$ при сравнении с контролем жизнеспособности клеток (точка “0”), ** $p < 0,05$ при сравнении с показателем жизнеспособности без ИФН α -2b, *** $p < 0,05$ с показателями при концентрации микрокапсул 0,75 и 1,5 мг/мл.

Улучшение монодисперсности распределения и сферичности микрокапсул с PLGA, количественная оценка эффективности инкапсуляции и нагрузки ИФН α -2b, фармакокинетики и фармакодинамики его инкапсулированной формы являются планируемыми задачами для нашей дальнейшей работы.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физико-химических методов анализа Томского государственного университета за исследования методами ЯМР и газовой хроматографии.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России, соглашение № 14.575.21.0164 от 26.09.2017 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0164) в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Danhier F., Ansorena E., Silva J.M., Coco R., Breton A., Pr  at V. // J. Control. Release. 2012. V. 161. № 2. P. 505–522.
- Freiberg S., Zhu X.X. // Intern. J. Pharmaceutics. 2004. V. 282. P. 1–18.
- Bock N., Dargaville T.R., Woodruff M.A. // Prog. Polym. Sci. 2012. V. 37. № 11. P. 1510–1551.
- Mir M., Ahmed N., Rehman A.U. // Colloids Surf. B. Biointerfaces. 2017. V. 159. P. 217–231.
- Биологические методы лечения онкологических заболеваний / Под ред. В.Т. ДеВита, С. Хеллмана, С.А. Розенберга. М.: Медицина, 2002. С. 362–381.
- Danks L., Takayanagi H. Immunology and Bone // J. Biochem. 2013. V. 154. P. 29–39.
- Timin A.S., Gould D.J., Sukhorukov G.B. // Expert Opin. Drug. Del. 2017. V. 14. № 5. P. 583–587.
- Kurzina I.A., Pukhova I.V., Botvin V.V., Filimoshkin A.G., Savkin K.P., Oskomov K.V., Oks E.M., Pukhova I.M. // AIP Conf. Proc. 2015. V. 1688. P. 030033-1–030033-7.
- Botvin V., Pozdniakov M., Filimoshkin A. // Polymer Degradation and Stability. 2017. V. 146. P. 126–131.
- Hungerford G., Benesch J., Mano J.F., Reis R.L. // Photochem. Photobiol. Sci. 2007. V. 67. № 2. P. 152–158.
- Xie J., Lim L.K., Phua Y., Hua J., Wang C.H. // J. Colloid Interface Sci. 2006. V. 302. № 1. P. 103–112.
- Sánchez A., Tob  o M., González L., Fabra A., Alonso M.J. // Eur. J. Pharm. Sci. 2003. V. 18. № 3/4. P. 221–229.
- Yang F., Song F.L., Pan Y.F., Wang Z.Y., Yang Y.Q., Zhao Y.M., Liang S.Z., Zhang Y.M. // J. Microencapsul. 2010. V. 27. № 2. P. 133–141.
- Berezovskaya I.V. // Pharmaceutical Chem. J. 2003. V. 37. № 3. P. 139–141.

ELECTROSPRAY PREPARATION OF BIOCOMPATIBLE LACTIDE—GLYCOLIDE COPOLYMER CAPSULES WITH INCORPORATION OF INTERFERON

**I. A. Khlusov, E. V. Kibler, V. L. Kudryavtseva, S. I. Tverdokhlebov, E. N. Bolbasov,
V. V. Botvin, A. D. Latypov, N. D. Gazatova, L. S. Litvinova,
Academician of the RAS V. M. Buznik, Academician of the RAS E. L. Choyazonov**

Received September 12, 2018

The electrospray method was used for the first time to prepare polymeric capsules from bioresorbable *dl*-lactide and glycolide copolymer loaded with biological molecules from the cell secretome and, in particular, human interferon α -2b (IFN α -2b). The obtained nearly spherical submicron capsules were studied by scanning electron and confocal laser microscopy. The capsules retain the structural integrity and the cytotoxic activity of IFN α -2b towards tumor cells. The electrospray method is distinguished by high adaptability and environmental safety and is suitable for manufacture of a broad range of materials with different composition and morphology promising for the targeted delivery of drugs and biological molecules.

Keywords: ionic-coordinate polymerization, PLGA microcapsules, human recombinant interferon- α , scanning electron microscopy, confocal scanning laser microscopy, *in vitro* biodegradation, cytotoxicity.

УДК 544.45, 53.091, 53.092

**ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОЛЫХ СТЕРЖНЕЙ
МЕТОДОМ СВС-ЭКСТРУЗИИ****А. П. Чижиков*, А. М. Столин, П. М. Бажин, член-корреспондент РАН М. И. Алымов**

Поступило 07.09.2018 г.

Показана возможность получения керамических полых стержней из материала на основе оксида алюминия Al_2O_3 методом СВС-экструзии. Предложен механизм образования таких стержней за счёт эффекта разбухания струи. Показано, что в области высоких температур материал может обладать вязкоупругими свойствами. Исследования проведены на системе $2B_2O_3-6Al-2Cr_2O_3$, которая в результате самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и восстановительно-окислительных реакций образует керамический материал на основе оксидов алюминия и хрома с упрочняющими частицами боридов хрома.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, деформация, вязкоупругие свойства, экструзия, оксид алюминия, полый стержень, эффект разбухания струи.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846709-711>

Керамические материалы на основе оксида алюминия получили широкое распространение в промышленности благодаря сочетанию высокой твёрдости, термостойкости и химической инертности [1–3]. Такие материалы являются перспективными при получении чехлов для термопар при температурных измерениях в агрессивных средах, тиглей для процессов спекания и испарения металлов, плавки оксидной керамики, выращивания монокристаллов, а также при изготовлении струеформирующих сопел для гидроабразивной резки материалов.

Принципиально новый подход в организации технологического процесса получения изделий из керамических материалов на основе оксида алюминия открывается при применении метода СВС-экструзии, который сочетает процесс горения в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и последующее высокотемпературное деформирование [3, 4]. Перспективность этого метода обусловлена возможностью проводить в едином технологическом цикле синтез необходимого материала из порошков исходных компонентов и формовать изделие заданного размера и формы в одном технологическом цикле. При этом совершенно исключаются энергозатраты на внешний нагрев материалов до высоких температур. После высокотемпературного синтеза материал размягчается, формируется пористая масса,

в которой во время экструзии происходит формирование конечной структуры. Под действием приложенного внешнего давления полученная пористая масса уплотняется и выдавливается через формирующую матрицу.

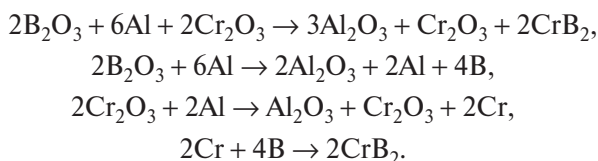
Объектом исследования являлась порошковая система $2B_2O_3-6Al-2Cr_2O_3$. В данной системе в результате термитного восстановления оксида бора и частичного восстановления оксида хрома алюминием образуется керамическая композиция на основе оксидов указанных металлов. Данные реакции являются очень экзотермичными и вносят основной вклад в тепловой эффект системы. Выделяющийся в ходе восстановления бор образует борид хрома CrB_2 . Поскольку оксиды алюминия и хрома обладают неограниченной растворимостью друг в друге, в полученном материале образуется твёрдый раствор $(AlCr)_2O_3$, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа. Такая композиция позволяет, во-первых, повысить прочностные характеристики оксида алюминия, который сам по себе является хрупким материалом, за счёт введения боридов хрома. Во-вторых, оксид хрома является огнеупорным материалом, что также положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках получаемого изделия. И в-третьих, использование недорогих порошков оксидов и алюминия в качестве исходных компонентов снижает стоимость материала.

В результате восстановительно-окислительных реакций, приведённых ниже, образовывался керамический материал на основе оксидов алюминия и хрома с упрочняющими частицами боридов хрома:

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерзжанова

Российской Академии наук, Черноголовка Московской обл.

**E-mail: chiz_an_pz@mail.ru*



Согласно результатам рентгенофазового анализа (рис. 1), полученным на образцах, вырезанных по всей длине стержней, материал состоит из трёх фаз, а именно оксида алюминия, твёрдого раствора оксидов алюминия и хрома и моноборида хрома.

В настоящей работе представлены результаты исследования возможности получения керамических полых стержней методом СВС-экструзии при использовании эффекта разбухания струи.

Явление разбухания струи известно и достаточно хорошо изучено в теории и практике экструзии растворов или расплавов полимеров. Суть эффекта заключается в увеличении диаметра струи материала в 3–4 раза по отношению к диаметру выходного отверстия фильеры [5–7]. После выхода материала из фильеры образующийся стержень имеет внешний диаметр больший, чем диаметр отверстия фильеры. При приложении внешнего давления материал попадает в конусную часть фильеры, проходит через её отверстие и при этом уплотняется. Упругая составляющая энергии накапливается в системе и затем, после выхода материала из матрицы, высвобождается, что приводит к образованию трещин, разрывов и прочих дефектов. В этих условиях явление разбухания струи является вредным эффектом [8]. Такое поведение полимерных материалов связано с особенностью их строения, а именно с наличием в структуре длинных полимерных молекул. Благодаря этому строению полимерная жидкость (расплав,

раствор) обладает вязкоупругими свойствами [9, 10]. В результате при выходе материала из отверстия в струе возникают напряжения, которые растягивают материал в поперечном направлении.

Структура керамических СВС-материалов отличается от структуры полимеров. Однако и в условиях СВС-экструзии при выдавливании материала из матрицы в воздух диаметр образующегося компактного стержня, как правило, больше диаметра отверстия матрицы. Можно предположить, что продукты горения исследуемой порошковой системы к моменту выхода из матрицы экструзионной пресс-формы обладают вязкоупругими свойствами, что приводит к проявлению эффекта разбухания, как и в случае полимерных материалов. Связано это с тем, что температура горения системы составляет 2010 °С. Эта температура значительно выше температуры плавления исходных компонентов, а именно алюминия (660 °С) и оксида бора (450 °С), но в то же время ниже температуры плавления оксида хрома (2435 °С) и образующихся в ходе реакции оксида алюминия (2072 °С) и бориды хрома (2100 °С). Таким образом, в зоне реакции и прилегающей зоне прогрева одновременно идут процессы плавления исходных компонентов и кристаллизации продуктов синтеза. За зоной горения образуется расплав с распределёнными по нему закристаллизовавшимися частицами продуктов синтеза, т.е. формируется вязкоупругая жидкость, аналогичная по структуре расплаву полимеров. Затем при экструзии материала из фильеры происходит разбухание струи, сопровождающееся интенсивным выделением газообразного оксида бора, температура кипения которого составляет 1860 °С. Для преодоления этого вредного эффекта (рис. 2) в практике СВС-экструзии обычно используется направляющий калибр, диаметр которого несколько меньше, чем диаметр отверстия матрицы. В этих условиях происходит обжатие выдавливаемого стержня, что обеспечивает сохранение формы стержня, и поверхность получаемого стержня становится гладкой.

Новый эффект наблюдается в случае использования калибра, диаметр которого больше диаметра выходного сечения матрицы (рис. 3а) [11]. Экспериментально показано, что после выхода из отверстия формирующей фильеры под действием накопившихся упругих напряжений материал прижимается к стенкам калибра. Поскольку количества материала не хватает, чтобы заполнить полностью калибр, образуется полый стержень.

В ходе экструзии были сформированы стержни диаметром 6 мм и длиной более 100 мм с внутренним диаметром 3 мм (рис. 3б).

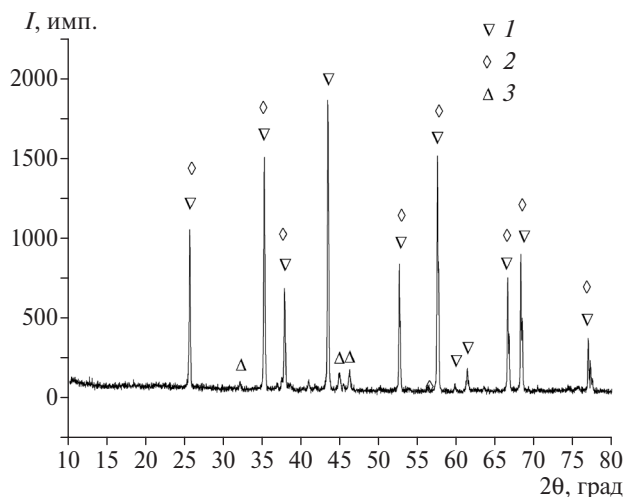


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа материала полученных стержней; 1 — Al_2O_3 , 2 — $(\text{Al}_{0.948}\text{Cr}_{0.052})_2\text{O}_3$, 3 — CrB .



Рис. 2. Пример негативного влияния эффекта разбухания струи при СВС-экструзии.

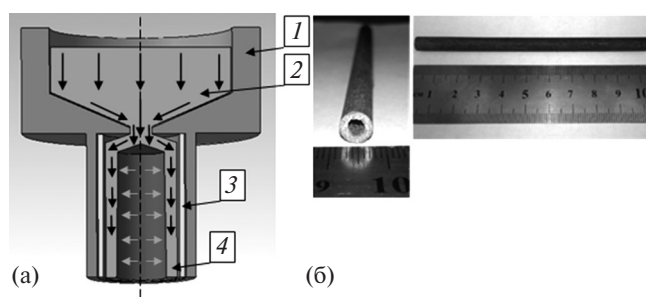


Рис. 3. Схема процесса образования полого стержня в ходе СВС-экструзии: (а) — 1 — пресс-форма, 2 — горячий синтезированный материал, 3 — кварцевый калибр, 4 — формирующийся полый стержень; (б) — пример внешнего вида полученных стержней.

Таким образом, показано, что явление разбухания струи внутренне присуще продуктам горения в условиях СВС-экструзии, и это явление может быть полезным в технологической практике для изготовления изделий различного назначения из керамических материалов на основе оксидов алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li L., Pu S.X., Liu Y.H., Zhao L.B., Ma J., Li J.G. High-Purity Disperse Alpha- Al_2O_3 Nanoparticles Syn-

- thesized by High-Energy Ball Milling // *Adv. Powder Technol.* 2018. V. 29. P. 2194–2203.
2. Wang Z.G., Ouyang J.H., Ma Y.H., et al. Insights into Microstructural Formation of Pulse Plasma Semisolid to Liquid Processing of Al_2O_3 – ZrO_2 Eutectic Ceramics // *J. Amer. Ceram. Soc.* 2018. V. 101. P. 3773–3779.
3. Yu W.J., Zheng Y.T., Yu Y.D., Lin F.Y., Su X.Y., Yang P. The Reaction Mechanism Analysis and Mechanical Properties of Large-Size Al_2O_3 / ZrO_2 Eutectic Ceramics Prepared by a Novel Combustion Synthesis // *Ceram. Int.* 2018. V. 44. P. 12987–12995.
4. Konstantinov A.S., Bazhin P.M., Stolin A.M., Kostitsyna E.V., Ignatov A.S. Ti–B-Based Composite Materials: Properties, Basic Fabrication Methods, and Fields of Application (Review) // *Compos. Pt A. Appl. Sci. Manuf.* 2018. V. 108. P. 79–88.
5. Mitsoulis E., Hatzikiriakos S.G. Annular Extrudate Swell of a Fluoropolymer Melt // *Int. Polym. Proc.* 2018. V. 27. P. 535–546.
6. Wang J.N., Wang T., Xu J., Yu J.C., Zhang Y.M., Wang H.P. Study on Spinnability of Polyacrylonitrile Solution Based on Dynamics Simulation of Dry-Jet Wet Spinning // *J. Appl. Polym. Sci.* 2018. V. 135. P. 8.
7. Xia X.L., Wang J.N., Wang H.P., Zhang Y.M. Numerical Investigation of Spinneret Geometric Effect on Spinning Dynamics of Dry-Jet Wet-Spinning of Cellulose / BMIM Cl Solution // *J. Appl. Polym. Sci.* 2016. V. 133. P. 11.
8. Ouyang Q., Chen Y.S., Zhang N., Mo G.M., Li D.H., Yan Q. Effect of Jet Swell and Jet Stretch on the Structure of Wet-Spun Polyacrylonitrile Fiber // *J. Macromol. Sci. Pt B.* 2011. V. 50. P. 2417–2427.
9. Xie S.J., Schweizer K.S. Consequences of Delayed Chain Retraction on the Rheology and Stretch Dynamics of Entangled Polymer Liquids under Continuous Nonlinear Shear Deformation // *Macromolecules.* 2018. V. 51. P. 4185–4200.
10. Lu Y.Y., An L.J., Wang J. Classical Phenomenological Models of Polymer Viscoelasticity // *Acta Polym. Sin.* 2016. V. 6. P. 688–697.
11. Чижиков А.П., Бажин П.М., Столин А.М. Способ изготовления керамических полых стержней. Пат. РФ № 2663514 // Бюл. 2018. № 22.

PRODUCTION OF HOLLOW CERAMIC RODS BY SHS EXTRUSION

A. P. Chizhikov, A. M. Stolin, P. M. Bazhin, Corresponding Member of the RAS M. I. Alymov

Received September 7, 2018

The possibility of producing hollow ceramic rods from an Al_2O_3 -based material by SHS extrusion was first shown. A mechanism of formation of such rods by die swell was proposed. It was demonstrated that, at high temperatures, the material can have viscoelastic properties. The studies were performed in the system $2\text{B}_2\text{O}_3$ – 6Al – $2\text{Cr}_2\text{O}_3$, in which a ceramic material based on aluminum and chromium oxides with strengthening chromium boride particles forms by self-propagating high temperature synthesis and redox reactions.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, deformation, viscoelastic properties, extrusion, aluminum oxide, a hollow rod, die swell effect.

УДК 541.148

НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $ZrO_2-Y_2O_3$
ДЛЯ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВМ. Ф. Вильданова^{1,*}, А. Б. Никольская¹, С. С. Козлов¹,
О. К. Карягина¹, Л. Л. Ларина¹, О. И. Шевалеевский¹, О. В. Альмяшева²,
член-корреспондент РАН В. В. Гусаров³

Поступило 16.10.2018 г.

Исследованы структурные, оптические и энергетические характеристики наночастиц состава ZrO_2/Y_2O_3 с содержанием 0; 3 и 10 мол.% Y_2O_3 , синтезированных в гидротермальных условиях. С использованием полученных наноструктур созданы тонкоплёночные электропроводящие фотоэлектроды для перовскитных солнечных элементов вида стекло/FTO/ $ZrO_2-Y_2O_3/CH_3NH_3PbI_3/spiro-MeOTAD/Au$. Сравнительные исследования фотовольтаических параметров ПСЭ в условиях солнечного облучения AM1.5G (1000 Вт/м^2) показали, что элементы с фотоэлектродами на основе системы $ZrO_2-Y_2O_3$ обладают значительно большей эффективностью преобразования солнечной энергии в электрическую в сравнении с перовскитными солнечными элементами на основе электродов из недопированных наночастиц ZrO_2 .

Ключевые слова: наноструктуры, ZrO_2 , тонкие плёнки, полупроводники, солнечная фотоэлектрика, перовскитные солнечные элементы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846712-715>

Разработка новых наноструктурированных материалов для солнечных элементов (СЭ) следующего поколения представляет серьёзный вызов для современной физической химии и химической технологии [1]. Наиболее перспективны СЭ на основе органонеорганических соединений со структурой перовскита — перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) [2]. Эффективность ПСЭ во многом определяет светопоглощающий электропроводящий фотоэлектрод, в качестве которого используют наноструктурированные плёнки диоксида титана (TiO_2) с шириной запрещённой зоны $E_g \sim 3,0–3,2 \text{ эВ}$ [3]. Вопрос о применимости в электропроводящих системах оксидных материалов с очень большими E_g всегда был дискуссионным, так как транспортные характеристики материала ухудшаются по мере увеличения E_g [4]. Однако в наноструктурированных системах перенос заряда может происходить не только по классической схеме, но и на основе прыжкового механизма по локализованным состояниям в запрещённой зоне, которые

возникают из-за наличия дефектов на поверхности наночастиц [5]. Большой интерес представляет использование в электропроводящих наноструктурах диоксида циркония (ZrO_2) с $E_g = 5–5,7 \text{ эВ}$ [6]. Структура и морфология наночастиц ZrO_2 зависят от условий синтеза [7]. При этом допирование ZrO_2 оксидом иттрия (Y_2O_3) позволяет варьировать размеры частиц и характеристики получаемой системы $ZrO_2-Y_2O_3$. Было показано, что допирование оксидами редкоземельных элементов приводит к формированию структур типа “ядро—оболочка” с высокой концентрацией поверхностных дефектов [8], а использование допированных фотоэлектродов в СЭ увеличивает эффективность фотопреобразования [9, 10].

Ранее сообщалось об исследовании работы ПСЭ с фотоэлектродами из недопированных наночастиц ZrO_2 [11]. В настоящей работе мы синтезировали недопированные и допированные Y_2O_3 нанопорошки ZrO_2 , использованные для создания наноструктурированных фотоэлектродов и конструирования на их основе серии ПСЭ. Были также измерены основные фотовольтаические характеристики сконструированных ПСЭ.

Наночастицы системы $ZrO_2-Y_2O_3$ получали дегидратацией совместно осаждённых гидроксидов в гидротермальных условиях по методике, описанной в [12]. Фотоэлектроды из наноструктур $ZrO_2-Y_2O_3$ толщиной около 200 нм были сформированы

¹ Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля
Российской Академии наук, Москва

² Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет “ЛЭТИ”
им. В.И. Ульянова (Ленина)

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской Академии наук, Санкт-Петербург

*E-mail: mvildanova@sky.chph.ras.ru

на стеклянных подложках с проводящим покрытием методом спин-коутинга (spin-coating). Конструирование ПСЭ проводили в атмосферных условиях при высокой влажности (порядка 50–60%) последовательным нанесением на поверхность фотоэлектрода перовскитного слоя из иодида свинца и иодида метиламмония $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, слоя дырочного проводника Spiro-MeOTAD и токопроводящих золотых контактов [3, 12]. Таким образом были получены ПСЭ со структурой стекло/FTO/ $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /spiro-MeOTAD/Au, в которых содержание Y_2O_3 составляло 0 (недопированная система), 3 и 10 мол. %.

Результаты элементного анализа (EDAX) нанопорошков $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (0, 3, 10 мол. % Y_2O_3) показали, что соотношение элементов Zr : Y соответствует составу, заданному при синтезе композиций, в пересчёте на оксиды. Рентгеновская дифрактограмма ZrO_2 (рис. 1) содержит максимумы, отвечающие тетрагональной (53%) и моноклинной (47%) модификациям ZrO_2 . Введение в систему 3 мол. % Y_2O_3 приводит к заметному уменьшению содержания фазы $m\text{-ZrO}_2$ (5%), а 10 мол. % Y_2O_3 — к её полному исчезновению. Размер кристаллитов $m\text{-ZrO}_2$ и $t\text{-ZrO}_2$ составил 16 ± 2 и 14 ± 2 нм соответственно. Показано, что при введении 10 мол. % Y_2O_3 размер кристаллитов уменьшается до 5 ± 1 нм, что обусловлено формированием структуры “ядро—оболочка”, в которой поверхностный слой наночастиц обогащён Y_2O_3 [13]. Допирование Y_2O_3 приводит к стабилизации фазы $t\text{-ZrO}_2$, вследствие чего образцы приобретают монофазную структуру. Спектры диффузного отражения (R) для системы $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ (рис. 2) показывают, что содержание Y_2O_3 влияет на величину E_g , которая для прямых электронных переходов вычисляется на основе следующего соотношения Тауца [14]:

$$\alpha(h\nu) = C \frac{(h\nu - E_g)^{1/2}}{h\nu}.$$

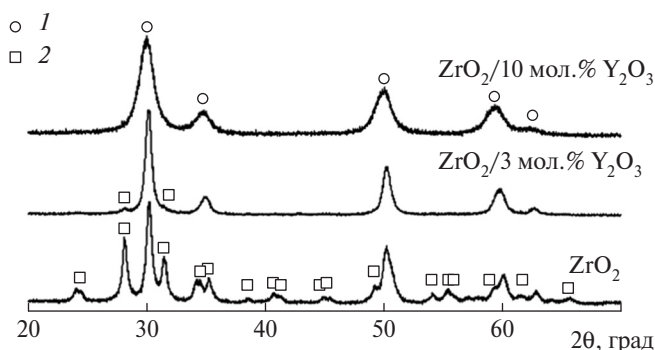


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы нанопорошков на основе $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$; 1 — $t\text{-ZrO}_2$, 2 — $m\text{-ZrO}_2$.

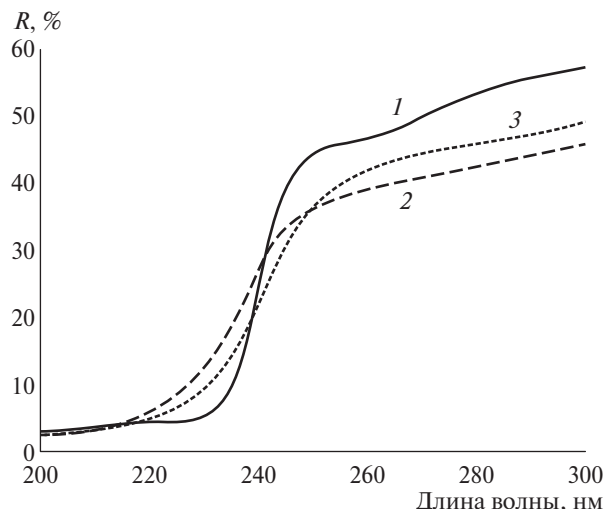


Рис. 2. Спектры диффузного отражения для порошковых образцов ZrO_2 (1), $\text{ZrO}_2/3$ мол. % Y_2O_3 (2) и $\text{ZrO}_2/10$ мол. % Y_2O_3 (3).

Здесь α — коэффициент оптического поглощения, C — постоянная, $h\nu$ — энергия фотона.

Численные значения E_g для ZrO_2 и $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ были получены графической экстраполяцией линейных участков зависимостей $(\alpha h\nu)^2$ от энергии фотона (рис. 3) и составили: для недопированного ZrO_2 5,53 эВ, для $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (3 мол. %) 5,63 эВ и для $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (10 мол. %) 5,45 эВ. Таким образом, установлено, что E_g растёт по мере допирования, однако для $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (10 мол. %) E_g оказалось меньше, чем для недопированного ZrO_2 , что связано со значительно меньшими размерами кристаллитов.

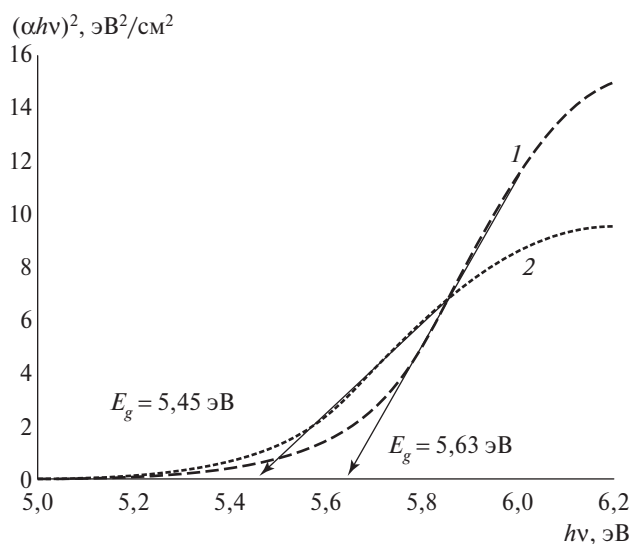


Рис. 3. Графическое определение оптической величины E_g для образцов $\text{ZrO}_2/3$ мол. % Y_2O_3 (1) и $\text{ZrO}_2/10$ мол. % Y_2O_3 (2) по зависимостям $(\alpha h\nu)^2$ от $h\nu$.

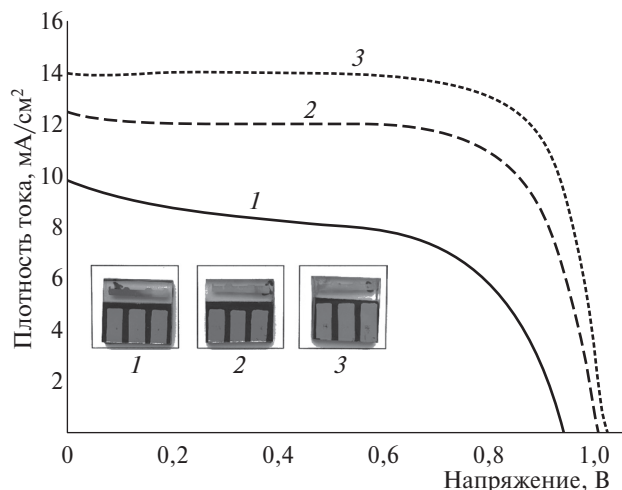


Рис. 4. ВАХ для ПСЭ с фотоэлектродами из наноструктур на основе системы $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$. На врезке фотографии сконструированных ПСЭ.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ), приведённые на рис. 4, получены при облучении ПСЭ интенсивностью $P_{\text{IN}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ (AM1.5G). Фотовольтаические параметры ПСЭ приведены в табл. 1. Эффективность фотопреобразования η рассчитывалась на основе ВАХ по формуле

$$\eta = \frac{J_{\text{sc}} V_{\text{oc}} FF}{P_{\text{IN}}} \cdot 100\%,$$

где J_{sc} — плотность тока короткого замыкания, V_{oc} — напряжение холостого хода, FF — фактор заполнения.

Исследования работы ПСЭ с фотоэлектродами из недопированного ZrO_2 и системы $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ показали преимущества допированных фотоэлектродов, при использовании которых наблюдались более высокие токи короткого замыкания, факторы заполнения и повышенные эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. Наилучшее значение эффективности в 10,46% получено для ПСЭ с фотоэлектродом $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (10 мол.%), что значительно превышает соответствующую величину в 5,1% для ПСЭ на основе ZrO_2 -фотоэлектрода.

В результате мы синтезировали и изучили наноструктуры на основе системы $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ с различным содержанием Y_2O_3 , которые использованы для создания тонкоплёночных электропроводящих фотоэлектродов для ПСЭ. Сконструированы и исследованы ПСЭ вида стекло/FTO/ $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ /CH₃NH₃PbI₃/spiro-MeOTAD/Au. Показано, что эффективность преобразования солнечной энергии в ПСЭ с фотоэлектродами на основе системы $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ значительно превышает аналогичный показатель для ПСЭ с фотоэлектродом из недопированного

Таблица 1. Фотовольтаические параметры ПСЭ с фотоэлектродами из наноструктур на основе системы $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$

Тип фотоэлектрода	V_{oc} , В	J_{oc} , мА/см^2	FF , отн. ед.	η , %
ZrO_2	0,92	9,77	0,56	5,1
$\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (3 мол.%)	1,01	12,42	0,69	8,66
$\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (10 мол.%)	1,02	13,86	0,74	10,46

ZrO_2 . Полученные результаты продемонстрировали возможность успешного применения наноструктурированных материалов с очень большой запрещённой зоной ($E_g > 5 \text{ эВ}$) в электропроводящих фотоэлектродах для солнечных элементов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 17–19–01776).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shevaleevskiy O. // Pure and Appl. Chem. 2008. V. 80. № 10. P. 2079–2089.
2. Marinova N., Tress W., Humphry Baker R., Dar M.I., Bojinov V., Zakeeruddin S.M., Nazeeruddin M.K., Gratzel M. // ACS Nano. 2015. V. 9. P. 4200–4209.
3. Шевалеевский О.И., Никольская А.Б., Вильданова М.Ф., Козлов С.С., Алексеева О.В., Вишнёв А.А., Ларина Л.Л. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 8. С. 36–42.
4. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. V. 1/2. N.Y.: Wiley, 2006. 832 p.
5. Oum K., Lohse P.W., Klein J.R., Flender O., Scholz M., Hagfeldt A., Boschloo G., Lenzer T. // Phys. Chem. and Chem. Phys. 2013. V. 15. P. 3906–3916.
6. Chang S., Doong R. // Chem. Mater. 2007. V. 19. P. 4804–4810.
7. Bugrov A.N., Almjasheva O.V. // Nanosystems: Phys., Chem., Math. 2013. V. 4. № 6. P. 810–815.
8. Альмяшева О.В., Смирнов А.В., Федоров Б.А., Томкович М.В., Гусаров В.В. // ЖОХ. 2014. Т. 84. № 5. С. 710–716.
9. Tsvetkov N., Larina L., Shevaleevskiy O., Ahn B.T. // Energ. Environ. Sci. 2011. V. 4. P. 1480–1486.
10. Kozlov S., Nikolskaia A., Larina L., Vildanova M., Vishnev A., Shevaleevskiy O. // Phys. Status Solidi. A. 2016. V. 213. P. 1801–1806.
11. Bi D., Moon S.J., Haggman L., Boschloo G., Yang L., Johansson E.M.J., Nazeeruddin M.K., Gratzel M., Hagfeldt A. // RSC Adv. 2013. V. 3. № 41. P. 18762–18766.
12. Vildanova M.F., Kozlov S.S., Nikolskaia A.B., Shevaleevskiy O.I., Tsvetkov N.A., Alexeeva O.V., Larina L.L. // Nanosystems: Phys., Chem., Math. 2017. V. 8. № 4. P. 540–546.
13. Almjasheva O.V., Krasilin A.A., Gusarov V.V. // Nanosystems: Phys., Chem., Math. 2018. V. 9. № 4. P. 568–572.
14. Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. // Phys. Status Solidi. 1966. V. 15. P. 627–637.

NANOSTRUCTURED $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ -BASED SYSTEMS FOR PEROVSKITE SOLAR CELLS

**M. F. Vildanova, A. B. Nikolskaia, S. S. Kozlov, O. K. Karyagina, L. L. Larina,
O. I. Shevaleevskiy, O. V. Almjasheva, Corresponding Member of the RAS V. V. Gusarov**

Received October 16, 2018

$\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ nanostructured systems with different yttria content ($\text{Y}_2\text{O}_3 = 0, 3$ and $10 \text{ mol.}\%$) were synthesized under hydrothermal conditions and their structural, optical and electronic properties were investigated. Using $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ systems the electron-conductive thin-film photoelectrodes were fabricated and used to develop the perovskite solar cells (PSCs) with the device configuration glass/FTO/ $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{spiro-MeOTAD}/\text{Au}$. The comparative studies of the PSCs photovoltaic parameters revealed that under 1000 W/m^2 (AM1.5G) illumination solar cells with $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ photoelectrodes demonstrated considerably higher power conversion efficiency in comparison with PSCs based on the undoped ZrO_2 photoelectrodes.

Keywords: nanostructures, ZrO_2 , thin films, semiconductors, solar photovoltaics, perovskite solar cells.

УДК 549.27 (571.56)

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТИПЫ И ^{190}Pt – ^4He -ВОЗРАСТ ЖЕЛЕЗИСТОЙ ПЛАТИНЫ ИЗ РОССЫПЕЙ БАСЕЙНА Р. АНАБАР (СЕВЕРО-ВОСТОК СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

А. В. Округин^{1,*}, О. В. Якубович^{2,3}, А. М. Гедз^{2,3},
А. Л. Земнухов⁴, П. О. Иванов⁴

Представлено академиком РАН В.В. Ярмолюком 29.11.2016 г.

Поступило 24.10.2016 г.

Приводятся типоморфные особенности минералов платиновой группы (МПГ) и результаты ^{190}Pt – ^4He -датирования Fe–Pt-твёрдых растворов из комплексных золото-, платина-, алмазоносных россыпей бассейна р. Анабар с неустановленными материнскими породами. Впервые ^{190}Pt – ^4He -изотопная система использована для установления возможного возраста коренного источника россыпи МПГ, а в качестве минерало-геохронометра наряду с изоферроплатиной выступает и железистая платина с неупорядоченной структурой. МПГ в этих россыпях представлены в основном железистой платиной и изоферроплатиной, реже сплавами Ru–Ir–Os-состава. Рассчитанный валовый состав силикатного включения иридийной Pt соответствует породам ийолит-мельтейгитового ряда. Возраст зерен Fe–Pt твёрдых растворов, определенный ^{190}Pt – ^4He -методом, составляет 261 ± 13 млн лет. Таким образом, полученные данные указывают на связь МПГ из россыпей бассейна р. Анабар с пермо-триасовыми комплексами щелочно-ультраосновных пород.

Ключевые слова: минералы платиновой группы, крупные изверженные провинции, ^{190}Pt – ^4He -датирование, мафит-ультрамафиты, россыпи, Сибирская платформа.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846716-720>

В бассейне р. Анабар на северо-востоке Сибирской платформы известны комплексные Au-, Pt-, алмазоносные россыпи (рис. 1), источники которых не установлены [1–3]. Для определения потенциальных источников минералов платиновой группы (МПГ) были изучены их типоморфные особенности и определён возраст ^{190}Pt – ^4He -методом [4].

МПГ представлены хорошо окатанными уплощёнными, комковатыми зёрнами размером до 3,5 мм и слабо окатанными мелкими кубическими, октаэдрическими кристаллами и табличками с гексагональными очертаниями (рис. 2а). Подавляющее большинство МПГ относится к твёрдым Fe–Pt-растворам, реже встречаются минералы Ru–Ir–Os-состава. По данным рентгенографических исследований большинство минералов Pt–Fe-состава из россыпей проявлений бассейнов р. Анабар, Уэле, Буолкалах [1, 2] обладает гранецентрированной неупорядоченной решёткой, т.е. относится к желе-

зистой Pt. Для некоторых образцов получены рентгенограммы, характерные для упорядоченной структуры изоферроплатины (Pt_3Fe).

В Fe–Pt-сплавах из россыпей р. Маят, Эбелях (притоки р. Анабар) по данным микрозондового анализа на Camebax-Micro (ИГАБМ СО РАН) содержание Pt 64,5–90,6%, Fe 4,1–13,9%. Основные примеси: Rh, Ru, Ir, Pd. На тройной диаграмме Pt–(Ir+Os)–(Ru+Rh) составы этих Fe–Pt-сплавов расположены в основном вдоль Rh–Ru-стороны, что характерно для высокородистой Pt Вилуйского типа [3]. Меньшая часть точек отклоняется в сторону Ir-тренда, характерного для месторождений урало-алаянского [5] и алданского [3] типов. Остальные попадают в промежуточную область, которая характерна для МПГ из хромитовых руд альпинотипных ультрамафитов островодужного типа Тихоокеанского подвижного пояса (Красногорский массив) [6], а также для редких Fe–Pt-сплавов из Os-россыпей Гулинского [7–10], Бор-Уряхского [11] массивов. Для зёрен железистой Pt с низким содержанием Ir, Os, Ru, Rh отмечено нарастание доли Pd до 12%.

Минералы Ru–Ir–Os-состава р. Анабар обладают в основном гексагональной кристаллической решёткой и встречаются в виде пластинчатых обломков до 1–2 мм, среди которых часто находят индивиды

¹ Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской Академии наук, Якутск

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

³ Санкт-Петербургский государственный университет

⁴ ОАО “Алмазы Анабара”, Якутск

*E-mail: a.v.okrugin@diamond.ysn.ru

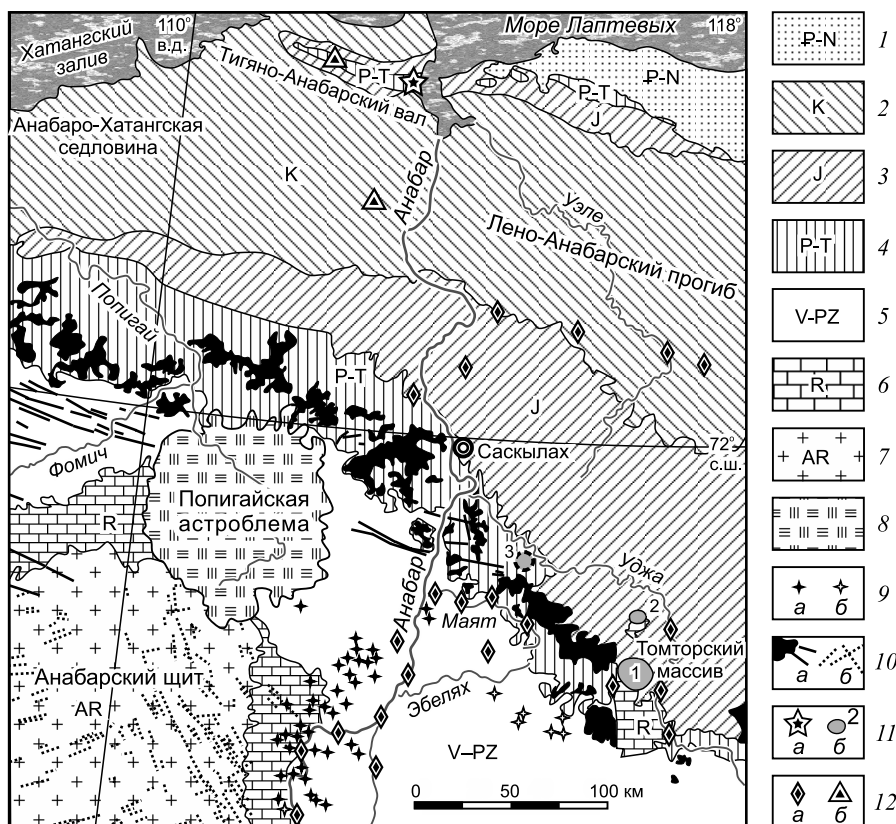


Рис. 1. Схема распространения Au–Pt-россыпей в бассейне р. Анабар. 1 — неоген-палеогеновые осадки; 2 — меловые пески, алевриты, галечники; 3 — юрские конгломераты, песчаники, алевролиты; 4 — триасовые и пермские песчаники, алевролиты; 5 — венд-палеозойские карбонатно-терригенные толщи; 6 — рифейские отложения; 7 — архейские метаморфические комплексы; 8 — структура Попигайской астроблемы; 9 — мезозойские кимберлитовые (a), базитовые (б) трубки; 10 — пермо-триасовые силлы, дайки долеритов, трахидолеритов (a) и рифейские базитовые дайки (б); 11 — выходы меланефелинитов, пикритобазальтов в устье р. Анабар (a) и комплексы щелочных и ультраосновных пород с карбонатами (б) (1 — Томтор; 2 — Богдо; 3 — предполагаемый массив Чюэмпэ [14]); 12 — россыпепроявления Au с Pt (a) и Ir–Os-минералами (б).

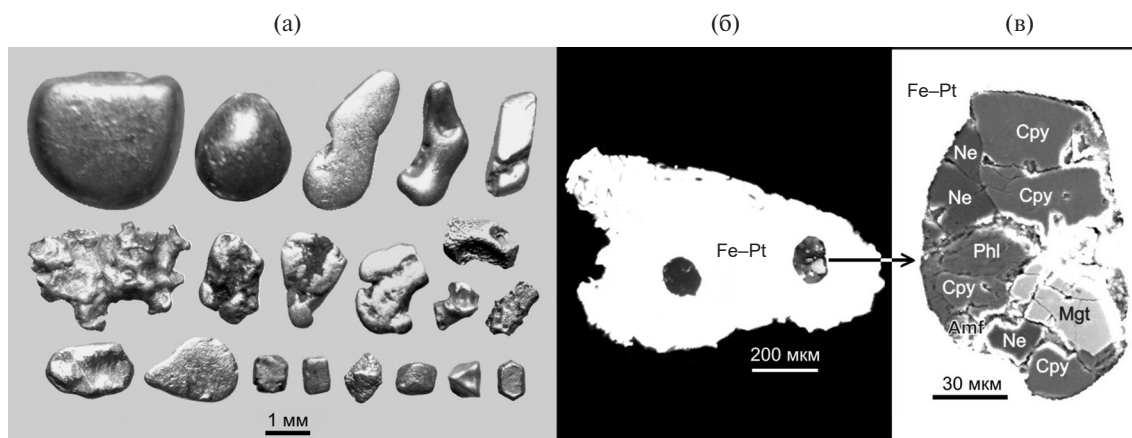


Рис. 2. МПГ из россыпей р. Майт, Эбелях: а — морфология зёрен; б — полированный срез железистой Pt с силикатными включениями; в — увеличенное изображение включения в отражённых электронах на сканирующем микроскопе JSM-6480LV (ИГАБМ СО РАН).

с гексагональными очертаниями. Реже отмечены минералы с кубической кристаллической решёткой существенно Ir-состава, представленные комковатыми зёрнами. Составы анабарских Ru–Ir–Os-

сплавов в целом перекрывают поля минералов, характерных для МПГ Вилуйского, Алданского типов, Os-россыпей массива Гули и хромититов Красногорского массива. В железистой Pt часто встречаются

включения Ru—Ir—Os-состава размером 10–30, реже до 100 мкм.

В Fe—Pt-сплавах также установлены микровключения лаурита RuS_2 , прассойта $Rh_{17}S_{15}$, василита $(Pd, Cu)_{16}S_7$, реже отмечены арсеносульфиды (Pt, Ir, Ru, Rh)AsS, арсениды (Rh, Ru)As, палладарсенид Pd_2As , тиошпинели маланит—купородситового ряда $(Pt, Rh, Ru)_2CuS_4$, котульскит $PdTe$, теллуropалладинит Pd_9Te_4 , кейтконнит $Pd_{20}Te_7$, Rh—Ru-содержащий пентландит, Pt—Pd-содержащие халькопирит, ковеллин, халькозин, а также Au-содержащий интерметаллид $PdCu$ — скаергаардит. Среди изученных минеральных включений преобладают сульфиды Rh, Ru. В то же время высокие содержания Rh, Ru в железистой Pt свидетельствуют о низкой фугитивности S в исходных магматических рудных источниках, что вызвало вхождение основной массы наиболее халькофильных платиноидов (Rh, Ru, Pd) в самородные фазы МПГ, а не в сульфидные минералы в форме изоморфной примеси, как в платиносодержащих месторождениях сульфидного типа.

Кроме рудных минералов в Fe—Pt-сплавах иногда встречаются включения (от первых до 50 мкм) клинопироксена, флогопита, амфибола, хлорита, серпентина, полевого шпата, титаномagnetита, ильменита, рутила, кальцита и др. [3]. В одном зерне иридий Pt состава $Pt_{78}Ir_8Os_{0,6}Rh_{3,5}Fe_{9,3}Ni_{0,6}$ обнаружено включение овальной формы, в поперечнике до 0,15 мм (рис. 2б, в). В нём присутствуют диопсид (Cpy) $Wo_{49-51}En_{38-42}Fs_{8-12}$, нефелин (Ne) $Ne_{80}Ks_{15}Q_5$, титаномagnetит (Mgt), флогопит (Phl), амфибол (Amf). Исходя из количественных соотношений минералов, в об. %: Cpy 40, Ne 30, Phl 15, Mgt 10, Amf 5 и их составов, включение имеет валовый состав, мас. %: SiO_2 41,22; TiO_2 1,19; Al_2O_3 15,14; Cr_2O_3 0,03; $FeO_{общ}$ 13,61; MnO 0,12; MgO 9,71; CaO 10,27; Na_2O 5,02; K_2O 2,88, что соответствует породам ийолит—мельтейгитового ряда.

Указанные типоморфные особенности платиновых металлов и их минералов-включений свидетельствуют о том, что МПГ россыпей бассейна р. Анабар обладают широким спектром минералого-геохимических особенностей, подобных минералам из россыпей родисто-железистой Pt Вилуйского типа [2] и иридийной изоферроплатины Инаглинского дунитового массива [3], и редким минералам иридийно-родиевой железистой Pt промежуточного состава Бор-Уряхского массива [11].

Для определения возраста коренных источников МПГ россыпей бассейна р. Анабар использован ^{190}Pt — 4He -метод прямого датирования платиновых минералов [4]. Принципиальная возможность такого подхода для решения поставленной задачи ранее продемонстрирована на примере ^{190}Pt — 4He -датирования изоферроплатины из месторождений Кондёр, Гальмознан [12]. Для геохронологических исследований были отобраны чистые (без включений) зёрна твёрдых Fe—Pt-растворов размером 0,5–3 мм из россыпи р. Маят, которые имеют разные содержания типоморфных элементов-примесей Rh, Ir, Pd (табл. 1).

Определение содержания радиогенного He в зёрнах твёрдых Fe—Pt-растворов проводили на масс-спектрометрическом комплексе МСУ-Г-01-М (ИГГД РАН) по методике, описанной в [12]. Ввиду того что железистую Pt ранее не использовали в качестве минерала ^{190}Pt — 4He -геохронометра, дополнительно была изучена кинетика термодесорбции He из этого минерала. Оказалось, что кинетика выделения He из железистой Pt с неупорядоченной структурой аналогична кинетике выделения He из упорядоченной решётки изоферроплатины. Не выделяется резко, взрывообразно при плавлении металла. Низкотемпературный пик на кривой термодесорбции для всех исследованных образцов практически отсутствует. Сопоставим с уровнем фона (рис. 3). Точки состава изученных образцов железистой Pt с разными содержаниями типоморфных примесей Rh, Ir, Pd расположены на “изохроне”, угол наклона которой соответствует возрасту 261 ± 13 млн лет (СКВО = 2,5%), т.е. результаты ^{190}Pt — 4He -датирования свидетельствуют об одновозрастном источнике (261 ± 13 млн лет) железистой Pt россыпей р. Маят, Эбелях.

Определение содержания радиогенного He в зёрнах твёрдых Fe—Pt-растворов проводили на масс-спектрометрическом комплексе МСУ-Г-01-М (ИГГД РАН) по методике, описанной в [12]. Ввиду того что железистую Pt ранее не использовали в качестве минерала ^{190}Pt — 4He -геохронометра, дополнительно была изучена кинетика термодесорбции He из этого минерала. Оказалось, что кинетика выделения He из железистой Pt с неупорядоченной структурой аналогична кинетике выделения He из упорядоченной решётки изоферроплатины. Не выделяется резко, взрывообразно при плавлении металла. Низкотемпературный пик на кривой термодесорбции для всех исследованных образцов практически отсутствует. Сопоставим с уровнем фона (рис. 3). Точки состава изученных образцов железистой Pt с разными содержаниями типоморфных примесей Rh, Ir, Pd расположены на “изохроне”, угол наклона которой соответствует возрасту 261 ± 13 млн лет (СКВО = 2,5%), т.е. результаты ^{190}Pt — 4He -датирования свидетельствуют об одновозрастном источнике (261 ± 13 млн лет) железистой Pt россыпей р. Маят, Эбелях.

Таблица 1. Результаты геохронологических ^{190}Pt — 4He -исследований твёрдых Fe—Pt-растворов из россыпи р. Маят

Номер зерна	Масса, мг	Состав минерала, мас. % в индексах	$^4He^*$, $cm^3/g \times 10^{-6}$	$^4He^*$, $\times 10^{-11}$	$^{190}Pt^*$, $\times 10^{-14}$
5-156	0,68	$Pt_{86,64}Ir_{0,24}Os_{0,06}Ru_{0,00}Rh_{0,00}Pd_{0,00}Fe_{10,15}Ni_{0,87}Cu_{0,10}$	5,31	0,97	2,35
12-156	1,48	$Pt_{80,89}Ir_{0,07}Os_{0,13}Ru_{0,96}Rh_{0,98}Pd_{2,73}Fe_{9,02}Ni_{0,16}Cu_{0,64}$	4,90	1,94	4,77
13-156	1,30	$Pt_{82,82}Ir_{3,29}Os_{0,48}Ru_{0,39}Rh_{1,94}Pd_{0,06}Fe_{6,12}Ni_{0,17}Cu_{0,49}$	5,04	1,75	4,29
21-156	3,34	$Pt_{82,53}Ir_{0,62}Os_{0,65}Ru_{1,11}Rh_{2,75}Pd_{0,08}Fe_{8,58}Ni_{0,27}Cu_{0,48}$	4,98	4,45	10,99
30-156	3,95	$Pt_{85,78}Ir_{0,51}Os_{0,07}Ru_{0,10}Rh_{0,01}Pd_{0,01}Fe_{9,10}Ni_{0,12}Cu_{0,64}$	4,93	5,22	13,51

Примечание. *Концентрация 4He , число атомов 4He и ^{190}Pt соответственно.

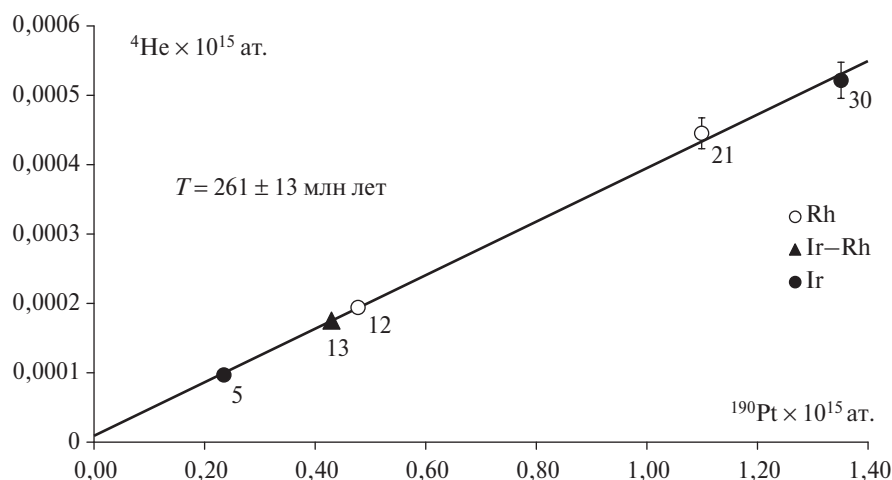


Рис. 3. ^{190}Pt – ^4He -изохрона для железистой Pt из россыпи р. Маят. Цифры на диаграмме — номер образца.

Таким образом, результаты проведённых исследований исключают предположение о возможной связи МПГ россыпей бассейна р. Анабар с докембрийскими источниками или породами массива Томтор (U–Pb-возраст: 391 ± 13 ; 686 ± 3 млн лет) [13]. Учитывая присутствие в матрице Fe–Pt-сплавов россыпи р. Маят полиминерального силикатного включения, отвечающего по составу породам ийолит–мельтейгитового ряда, в качестве их наиболее вероятного источника МПГ бассейна р. Анабар можно рассматривать комплексы щёлочно-ультраосновных пород пермо-триасового возраста. В связи с этим следует отметить развитие на севере Сибирской платформы комплексных золото-платиноносных россыпей, связанных с Гулинским вулканоплутоном ультраосновных и щёлочных пород с карбонатами Маймеча-Котуйской провинции [7–11]. Имеющиеся геофизические данные [14] свидетельствуют о возможности существования подобных комплексов щёлочно-ультраосновных пород с платинометальной минерализацией под мезозойским чехлом в пределах Лено-Анабарского прогиба.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Л.М. Поповой, Н.В. Христофоровой (ИГАБМ СО РАН) за помощь в проведении микрозондового анализа.

Источник финансирования. Исследования проведены в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (проект № 0381–2016–0003) и при поддержке грантов РФФИ (проекты 13–05–00717 и 17–05–00390).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпунт Б.Р. // Геология руд. месторождений. 1970. № 2. С. 123–126.

2. Okrugin A.V. // Intern. Geol. Rev. 1998. № 8. P. 677–687.
3. Округин А.В., Зайцев А.И., Борисенко А.С. и др. // Отеч. геология. 2012. № 5. С. 11–21.
4. Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г. и др. // Петрология. 2012. № 6. С. 545–559.
5. Cabri L.J., Harris D.C., Weiser T.W. Mineralogy and Distribution of Platinum-Group Mineral Placer Deposits of the World // Explor. and Mining Geol. 1996. № 2. P. 73–167.
6. Дмитриенко Г.Г., Мочалов А.Г., Паладжян С.А., Горячева Е.М. Химические составы породообразующих и аксессуарных минералов альпинотипных ультрамафитов Корякского нагорья. Ч. 2. Препринт. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1985. 60 с.
7. Балмасова Е.А., Смольская Л.С., Лопатина Л.А. и др. // ДАН. 1992. Т. 323. № 4. С. 748–751.
8. Лихачев А.П., Кириченко В.Т., Лопатин Г.Г. и др. // Зап. ВМО. 1987. № 1. С. 122–125.
9. Сазонов А.М., Романовский А.Э., Гринев О.М. и др. // Геология и геофизика. 1994. № 9. С. 51–65.
10. Малич К.Н., Рудашевский Н.С. // ДАН. 1992. Т. 325. № 5. С. 1026–1029.
11. Малич К.Н., Когарко Л.Н. // ДАН. 2011. Т. 440. № 6. С. 806–810.
12. Shukolyukov Yu.A., Yakubovich O.V., Mochalov A.G. Thesis of the 12th Intern. Platinum Symp. Ekaterinburg, 2014. P. 218–219.
13. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С. и др. // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199.
14. Поршнев Г.И., Степанов Л.Л. // Сов. геология. 1981. № 12. С. 103–106.

MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL TYPES AND ^{190}Pt – ^4He AGE OF FERROAN PLATINUM OF PLACERS OF THE ANABAR RIVER BASIN, NORTHEASTERN PART OF THE SIBERIAN PLATFORM

A. V. Okrugin, O. V. Yakubovich, A. M. Gedz, A. L. Zemnukhov, P. O. Ivanov

Presented by Academician of the RAS V.V. Yarmolyuk November 29, 2016

Received October 24, 2016

Typical features of platinum group minerals (PGMs) and the results of ^{190}Pt – ^4He dating of the Fe–Pt solid solutions are presented for complex gold–platinum–diamond placers with unidentified sources of the Anabar River basin. For the first time, the ^{190}Pt – ^4He isotopic system is used for determination of the possible age of the primary source of a PGM placer from the example of ferroan platinum with a disordered structure along with isoferroplatinum. The PGMs of these placers mostly include ferroan platinum and isoferroplatinum and rare Ru–Ir–Os alloys. The calculated bulk composition of the silicate inclusion of Ir platinum corresponds to the rocks of the ijolite–melteigite series. The ^{190}Pt – ^4He age of the Fe–Pt solid solution grains is 261 ± 13 Ma. Thus, our data indicate the relation between placer PGMs of the Anabar River basin and Permian–Triassic complexes of alkaline–ultramafic rocks.

Keywords: platinum-group minerals, large igneous provinces, ^{190}Pt – ^4He dating, mafic-ultramafic rocks, placers, Siberian platform.

УДК 553.9+553.21

РЕДКИЕ Th–Sc-МИНЕРАЛЫ В ПИКРИТАХ ЮЖНОГО УРАЛА
И ИХ ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕС. Г. Ковалев*, член-корреспондент РАН В. Н. Пучков,
С. С. Ковалев, С. И. Высоцкий

Поступило 02.08.2018 г.

Приведены первые данные о находке Th–Sc-минерализации в пикритовых комплексах Южного Урала. Описаны собственные минералы Th: торит, Sc-содержащие ториевые минералы. Вывод: формирование Th–Sc-минерализации обусловлено кристаллизацией остаточного расплава в локальном объеме.

Ключевые слова: Южный Урал, пикриты, ториевая минерализация, Sc-содержащий ториевый минерал, кристаллизация, остаточный расплав.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846721-724>

Ишлинский пикритовый комплекс входит в состав южноуральской пикритовой ассоциации, тела которой — южное продолжение зоны распространения пикритов Западно-Уральского поднятия и прилегающей части Восточно-Европейской платформы (рис. 1). Комплекс представлен тремя разобщёнными выходами (“Курманайская дайка”, Ишлинские пикриты, пикриты руч. Интурат), протягивающимися в субмеридиональном направлении более чем на 8–10 км. Породы относятся к среднему рифею, что основано на определении возраста Sm–Nd-методом по трём валовым составам и трём монофракциям пироксенов из них: 1270 ± 56 млн лет (СКВО = 1,11), а аппроксимация точек (валовая проба, клинопироксен, ортопироксен) одного образца дала изохрону с наклоном, отвечающим $T = 1291 \pm 67$ млн лет (СКВО = 0,66) [7, 8].

Для пород характерны порфирировидные, пойкилитовые близкие к кумулятивным структуры с идиоморфными и субидиоморфными кристаллами оливина (20–50 об.%) и пироксенов (40–50 об.%), сцементированные ксеноморфными кристаллами основного плагиоклаза (рис. 2а, б). В качестве второстепенных минералов присутствуют высокомагнезиальный биотит и коричневая роговая обманка. Акцессорные минералы: апатит, ильменит, магнетит, хромшпинелид и сульфиды, представленные пиротином, халькопиритом, пентландитом, миллеритом [4].

При детальном изучении минералогии пород комплекса на растровом электронном микроскопе

РЭММ-202М с EDA в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс, аналитик В.А. Котляров) нами были обнаружены торит ($\text{Th}_{0,68}\text{Mg}_{0,05}\text{Fe}_{0,03}\text{Ca}_{0,13}\text{K}_{0,02}\text{Ce}_{0,17}\text{Pb}_{0,02}\text{Nd}_{0,05}\text{La}_{0,09}\text{Al}_{0,19}\text{O}_4$) и Sc-содержащий ториевый минерал нестехиометричного состава ($\text{Th}_{0,79}\text{Mg}_{0,85}\text{Fe}_{0,46}\text{Ca}_{0,17}\text{K}_{0,10}\text{Ce}_{0,09}\text{Sc}_{0,06}\text{Pr}_{0,07}\text{Pb}_{0,05}\text{Nd}_{0,03}\text{Al}_{0,33}\text{Si}_{0,72}\text{P}_{0,25}\text{Al}_{0,03}\text{O}_{6,00}$), ($\text{Th}_{0,59}\text{Mg}_{0,93}\text{Fe}_{0,50}\text{Ca}_{0,28}\text{K}_{0,03}\text{Ce}_{0,06}\text{Sc}_{0,04}\text{Pr}_{0,05}\text{Pb}_{0,03}\text{Nd}_{0,02}\text{Al}_{0,47}\text{Si}_{0,75}\text{P}_{0,24}\text{Al}_{0,01}\text{O}_6$) (рис. 2в, г, рис. 3; табл. 1).

Как видно из приведённых микрофотографий (рис. 2в, г) и табл. 1, ксеноморфное выделение торита расположено на границе двух зёрен плагиоклаза — ($\text{Na}_{0,48}\text{Ca}_{0,50}\text{K}_{0,01}\text{Al}_{1,46}\text{Fe}_{0,02}\text{Si}_{2,53}\text{O}_{8,00}$), а его состав близок к минералам, описанным нами ранее в терригенных отложениях Шатакского вулканогенно-осадочного комплекса [5, 6]. Sc-содержащий ториевый минерал обнаружен в пространственной ассоциации с хлоритом, апатитом, алланитом ($\text{Ca}_{1,12}\text{Ce}_{0,48}\text{La}_{0,18}\text{Pr}_{0,07}\text{Nd}_{0,15}\text{Al}_{1,41}\text{Fe}_{1,54}\text{Mg}_{0,05}\text{Si}_{2,94}\text{Al}_{0,06}\text{O}_{12,00}\text{OH}$) (рис. 2г). В его химическом составе установлено высокое содержание Mg, Fe и пониженные по сравнению со стехиометрическим составом торита количества Th (табл. 1).

С нашей точки зрения, данная находка представляет значительный интерес, так как селективное накопление РЗЭ в минералах, обусловленное различиями в радиусах их ионов, предполагает, что в ториевых минералах должны концентрироваться элементы цериевой группы, к которой Sc не относится.

Сведения о находках минералов Th, в составе которых обнаружен Sc, довольно скудны в опубликованной литературе. Встречается упоминание о то-

Институт геологии Уфимского
федерального исследовательского центра
Российской Академии наук, Уфа
*E-mail: kovalev@ufaras.ru

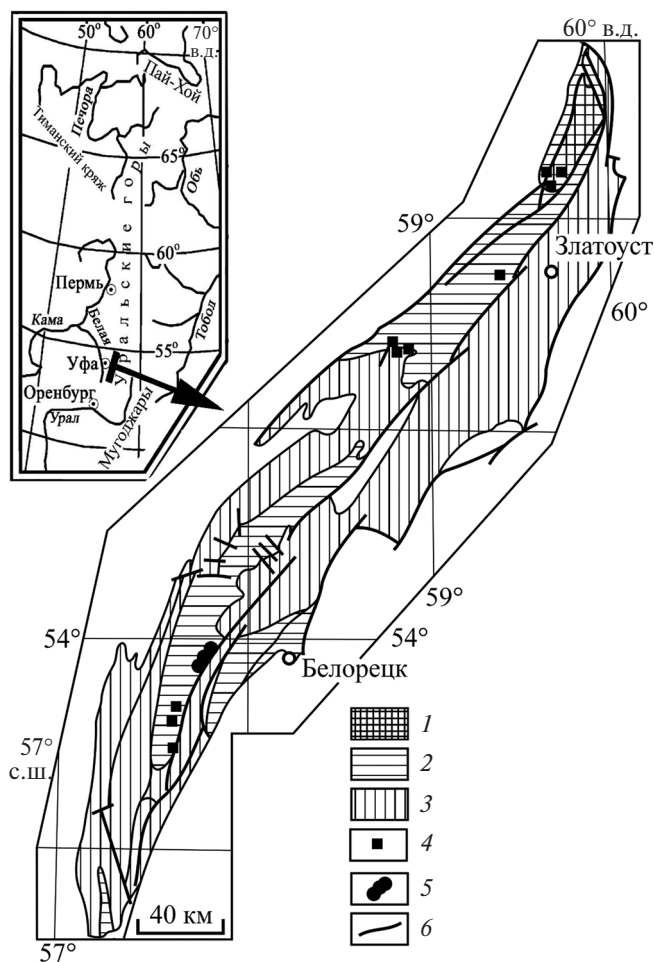


Рис. 1. Геологическая схема распространения пикритовых комплексов в пределах Башкирского мегантиклинория. 1 — архейско-протерозойские отложения, 2 — нижнерифейские отложения, 3 — среднерифейские отложения, 4 — тела разновозрастных пикритов, 5 — Ишлинский пикритовый комплекс, 6 — тектонические границы.

рианите с 0,3–0,46 мас.% Sc_2O_3 и в одном случае о торите с 0,05 мас.% Sc_2O_3 [1, 2, 9].

Геохимия Th относительно хорошо изучена. Его средние содержания в магматических породах уменьшаются от кислых (~18) к основным (~1,8–3) и ультраосновным (~0,004 г/т) разновидностям [1]. Основная форма нахождения Th в породах — это составная часть U–Th-минералов либо изоморфная примесь в акцессорных минералах. Скандий — лито/сидерофильный элемент, среднее содержание которого в базитах ~30, в ультрабазитах ~12 г/т [2]. По свойствам он близок к Fe^{2+} , Mg^{2+} , поэтому обычно рассеивается и изоморфно замещается в темноцветных минералах (пироксенах, амфиболах, биотитах) Fe^{2+} , Mg^{2+} . При сходстве Sc с Y и TPЗЭ (Er, Yb, Lu) он обладает индивидуальными особенностями, которые определяют его поведение в ми-

нералообразующих процессах. В пикритах Ишлинского комплекса среднее содержание Th 1,68; Sc 23,03 при разбросе значений 1,51–1,93 Th и 17,09–28,98 г/т Sc, т.е. содержания этих элементов близки к значениям, характерным для пород основного ряда.

Генетическая природа ториевой минерализации в пикритах Ишлинского комплекса выявляется при сравнительном анализе описанной нами ранее Th–REE-минерализации Шатакского комплекса [5, 6]. Из диаграммы ΣREE –Th (рис. 4) видно, что монациты и ториты Шатакского комплекса образуют единый тренд с коэффициентом аппроксимации 0,99, что свидетельствует о формировании минерализации в едином процессе, названном нами флюидно-магматическим [5]. Ториты из пород Ишлинского комплекса по этим параметрам отличаются от аналогов из пород Шатакского комплекса. Более того, для Sc-содержащих разновидностей различия ещё более “масштабны” (высокие содержания MgO , FeO , Ce_2O_3 , присутствие Sc, Pb и отсутствие U), что свидетельствует о различных механизмах формирования Th-минерализации в породах Шатакского и Ишлинского комплексов.

Исходя из этого обобщённая модель генезиса Th-минерализации в пикритах Ишлинского комплекса может быть представлена в следующем виде. На первом этапе (единый процесс кристаллизации подразделяется нами на условные этапы для удобства восприятия), когда кристаллизуются оливин и пироксены, Sc входит в их состав в виде изоморфной примеси (по данным Н.А. Григорьева [3], в базитах до 95% Sc сконцентрировано в железо-магнезиальных минералах и ильмените), а Th образует собственные минеральные фазы, так как высокий заряд Th^{4+} и сравнительно большой ионный радиус (0,95 Å) не позволяют ему изоморфно входить в решётки породообразующих минералов. В результате этого процесса формируется “типичный” торит, состав которого близок к составу аналогов из пород Шатакского комплекса. На следующем этапе начинается кристаллизация плагиоклаза, который не относится к эффективным концентраторам Sc, Th, в результате чего эти элементы обогащают остаточный расплав. Пространственная ассоциированность Sc-содержащего Th-минерала с хлоритом, апатитом, ортитом (рис. 2г) в первом приближении может дать представление о химическом и микроэлементном составе остаточного расплава. Высокие содержания MgO , FeO в составе Sc-содержащего торита также объяснимы с этих позиций. С точки зрения химической эволюции расплава при действии механизма

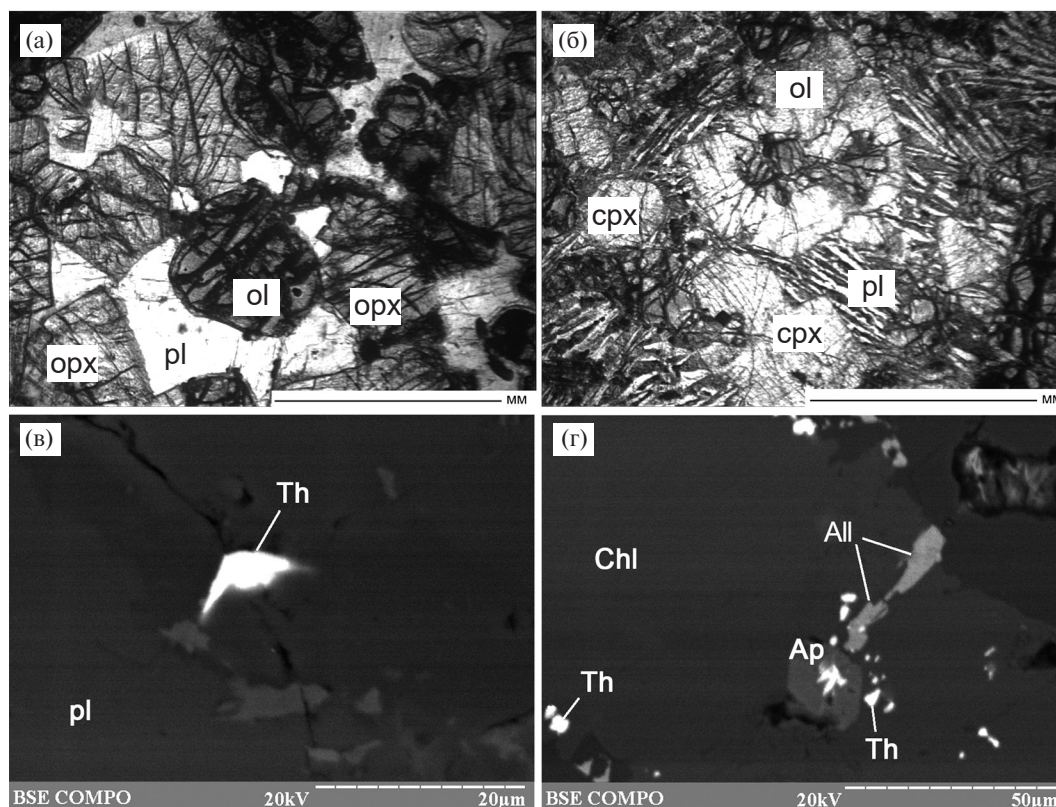


Рис. 2. Микрофотографии пород (а, б) и минералов пикритов (в, г) Ишлинского комплекса. ol — оливин, орх — ортопироксен, срх — клинопироксен, pl — плагиоклаз, Th — торит, Chl — хлорит, All — алланит, Ap — апатит.

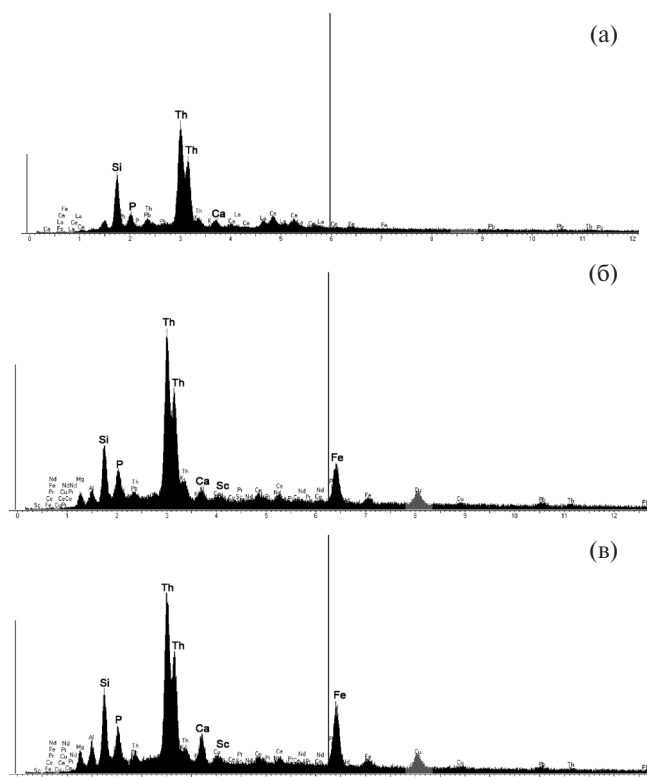


Рис. 3. Энергодисперсионные спектры торита (а) и Sc-содержащего Th-минерала (б, в).

Таблица 1. Химический состав (мас.%) ториевых минералов и алланита из пикритов Ишлинского комплекса

Оксид	1	2	3	4
MgO	0,62	8,29	10,35	0,32
FeO	0,66	7,92	9,96	18,29
Al ₂ O ₃	3,14	4,35	6,74	12,46
SiO ₂	12,75	10,38	12,44	29,25
P ₂ O ₅	2,87	4,22	4,6	—
K ₂ O	0,23	1,14	0,42	—
CaO	2,41	2,32	4,27	10,36
Sc ₂ O ₃	—	0,95	0,79	—
La ₂ O ₃	4,61	—	—	4,97
Ce ₂ O ₃	9,15	3,39	2,67	13,09
Pr ₂ O ₃	—	2,74	2,43	2,03
Nd ₂ O ₃	2,67	1,14	0,79	4,18
PbO ₂	1,27	2,93	1,67	—
ThO ₂	57,89	50,24	42,87	—
Сумма	98,27	100,01	100	94,95

Примечание. 1 — торит; 2, 3 — Sc-содержащий ториевый минерал; 4 — алланит.

кристаллизационной дифференциации процесс имеет “колебательный” характер: кристаллизация темноцветных (оливина, пироксенов) минералов обогащает остаточный расплав Ca, щелочами и от-

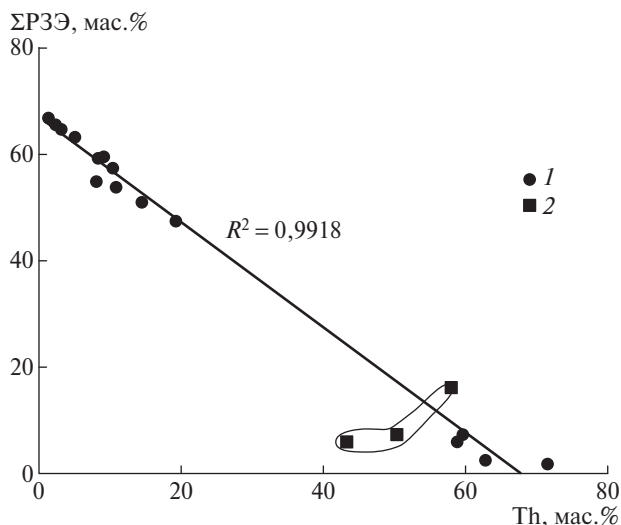


Рис. 4. Диаграмма $\Sigma\text{РЗЭ}-\text{Th}$ для монацитов и торитов из пород Шатакского комплекса (1) и торитов из пикритов Ишлинского комплекса (2).

части Si, что приводит к кристаллизации плагиоклаза, связывающего эти элементы в своём составе. При этом в зависимости от физико-химических параметров процесса кристаллизации остаточный расплав может обогащаться Fe, Mg (“феннеровский” тренд).

Таким образом, концентрация в локальном объёме остаточного расплава ряда элементов (РЗЭ, Sc, Th, P в нашем случае), не вошедших в кристаллизующиеся породообразующие минералы, приводит к формированию нетипичных минеральных ассо-

циаций и/или минералов с нехарактерными примесями.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема № 0252–2017–0012) и при финансовой поддержке РНФ, соглашение № 16–17–10192.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В., Юшко-Захарова О.Е., Борисенко Л.Ф., Овчинников Л.Н. Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам. М.: Недра, 1989. 462 с.
2. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с.
3. Григорьев Н.А. // Литосфера. 2011. № 1. С. 115–125.
4. Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Пиндюрина Е.О., Котляров В.А. // Зап. РМО. 2014. № 5. С. 74–84.
5. Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Высоцкий С.И. // Зап. РМО. 2017. № 5. С. 59–79.
6. Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Пучков В.Н. // ДАН. 2017. Т. 476. № 5. С. 547–552.
7. Носова А.А., Сазонова Л.В., Каргин А.В., Ларионова Ю.О., Горожанин В.М., Ковалев С.Г. // Петрология. 2012. Т. 20. № 4. С. 392–428.
8. Сазонова Л.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О., Каргин А.В., Ковалев С.Г. // Литосфера. 2011. № 3. С. 64–83.
9. Экологическая геохимия элементов. Экология. Кн. 5. Редкие d-элементы / Под ред. Э.К. Буренкова. М., 1997. 576 с.

RARE Th–Sc MINERALS IN PICRITES OF THE SOUTHERN URALS AND THEIR GENETIC VALUE

S. G. Kovalev, Corresponding Member of the RAS V. N. Puchkov,
S. S. Kovalev, S. I. Vysotsky

Received August 2, 2018

The first data on the discovery of Th–Sc mineralization in the pyritic complexes of the Southern Urals are presented. The minerals of Th (thorite) and Sc-containing thorium minerals are described. The conclusion is made that the Th–Sc mineralization formed due to crystallization of a residual melt in the local volume.

Keywords: Southern Urals, picrites, thorium mineralization, Sc-containing thorium mineral, crystallization, residual melt.

УДК 550.93:551.72

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД И ТРОНДЪЕМИТОВ ЦЕНТРАЛЬНОПРИАЗОВСКОЙ СЕРИИ: Sr-ИЗОТОПНАЯ ХЕМОСТРАТИГРАФИЯ И U–Pb-ГЕОХРОНОЛОГИЯ

Член-корреспондент РАН А. Б. Кузнецов^{1,*}, С. Б. Лобач-Жученко¹,
Т. В. Каулина², Г. В. Константинова¹

Поступило 04.06.2018 г.

Представлена Sr-изотопная характеристика карбонатных пород центральноприазовской серии (0,70322–0,70352), вычислен Nd-модельный возраст силикатных осадков этой серии (2,34–2,31 млрд лет) и определён U–Pb-возраст трондjemитов (2052 ± 5 млн лет), прорывающих карбонатные породы. Полученные данные доказывают, что морской осадочный чехол Приазовского блока, являющегося фрагментом раннедокембрийского континента Сарматия, формировался в раннем палеопротерозое 2,23–2,34 млрд лет назад.

Ключевые слова: Украинский щит, палеопротерозой, центральноприазовская серия, Sr-изотопная хемотрастиграфия, U–Pb-геохронология.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846725-728>

Последовательность формирования архей-палеопротерозойского осадочного чехла Сарматии имеет важное значение для реконструкции раннедокембрийской истории Земли. Карбонатные породы Приазовского блока, расположенного на юго-восточной окраине Украинского щита, характеризуют этап морского осадконакопления в пределах древнего континента Сарматия. В этой работе нами впервые уточнён возраст карбонатных пород Приазовского блока на основе метода Sr-изотопной хемотрастиграфии, изучения Sm–Nd-систематики ассоциированных силикатных осадков и определения U–Pb-возраста циркона из гранитоидов, прорывающих карбонатные породы.

Приазовский блок слагает юго-восточную часть Украинского щита. На северо-востоке он граничит с Днепровско-Донецким авлакогеном, на западе — с Орехово-Павлоградской компрессионной зоной сдвигового течения [1], отделяющей его от Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области, а на юге блок погружается в акваторию Азовского моря (рис. 1). В сложении Приазовского блока преобладают мигматиты и гранитоиды тоналит-трондjemитовой серии. Метаосадочные породы обнажены фрагментарно и разделяются на две серии: нижнюю западноприазовскую и верхнюю централь-

ноприазовскую [2, 3]. Нижняя серия содержит биотит-амфиболовые гнейсы, метаморфизованные ~3100–3000 млн лет назад и прорванные габбро-диоритами обиточенского комплекса с возрастом 2908–2940 млн лет [4]. Центральноприазовская серия сложена кварцитами, железистыми кварцитами, карбонатными породами, пироксеновыми гнейсами и силлиманит-кордиерит-гранатовыми гнейсами с примесью графита. Серия разделяется на две свиты: темрюкскую, демьяновскую. Породы этой серии метаморфизованы в условиях амфиболитовой и/или гранулитовой фации [5]. Первоначально центральноприазовская серия была отнесена к палеопротерозою [2], но в хронострастиграфической схеме раннего докембрия Украинского щита серия перемещена в архей [3].

Мраморы и ассоциированные с ними известково-силикатные породы развиты в темрюкской свите и распространены преимущественно в южной части Приазовского блока (рис. 1). Наиболее крупные обнажения мраморов расположены в бассейне р. Берда. Изученный разрез находится на правом берегу этой реки, выше с. Калайтановка (47°04'52.3" с.ш.; 36°59'18" в.д.). Карбонатные породы (мощностью более 50 м) простираются в юго-восточном направлении на 200–300 м. В породах наблюдается слоистость, выраженная переслаиванием карбонатных пачек (1–2 м) и тонкополосчатых мраморов с прослойками (2–3 см) силикатных пород. Образцы мраморов отобраны с помощью электробура из наименее выветрелой центральной части разреза. Кар-

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской Академии наук, Санкт-Петербург

² Геологический институт Кольского научного центра
Российской Академии наук, Апатиты Мурманской обл.

*E-mail: antonbor@mail.ru

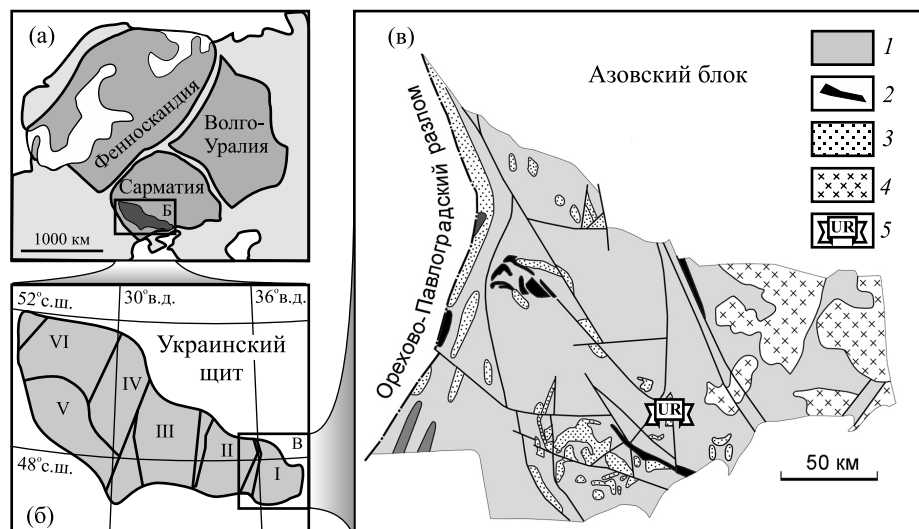


Рис. 1. Положение Украинского щита (а). Схема его тектонического строения (б). Геологическая схема Приазовской провинции (в) [1]. Тектонические провинции: I — Приазовская, II — Среднеприднепровская, III — Ингульская, IV — Росинско-Тикичская, V — Днестровско-Бугская, VI — Волынская. 1 — нерасчленённые архейские породы, 2 — реликты мезоархейских зеленокаменных поясов, 3 — палеопротерозойская центральноприазовская серия, 4 — палеопротерозойские гранитоиды, 5 — положение изученного разреза.

бонатные породы в этом разрезе прорваны жилами среднезернистых трондьемитов. В одной из жил был отобран образец, из которого выделен циркон для геохронологического изучения.

Циркон представлен крупными (300–700 мкм) короткопризматическими прозрачными кристаллами. Кристаллы светло-коричневые и гиацинтового габитуса. Католюминесцентное свечение (CL) кристаллов тусклое, а в обратно-рассеянных электронах (BSE) — однородное и яркое, что свидетельствует о высокой концентрации тяжёлых элементов и магматической природе циркона. Для геохронологического U–Pb-исследования взяты три навески наиболее прозрачных кристаллов, различающихся по размеру и коэффициенту удлинения. Концентрации U, Pb определяли методом изотопного разбавления со смешанным индикатором ^{208}Pb – ^{235}U на масс-спектраторе МИ-1201Т (Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты).

На диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}/^{238}\text{U}$ с конкордией три фигуративные точки (из них две конкордантные) образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 2054 ± 2 млн лет (рис. 2). Нижнее пересечение расположено около нуля, что подтверждает достоверность полученного возраста. Две конкордантные точки определяют возраст по конкордии в 2052 ± 5 млн лет при величине СКВО = 0,83 и вероятности конкордантности 0,36. Полученный возраст циркона соответствует времени магматической кристаллизации гранитов и ограничивает верхний

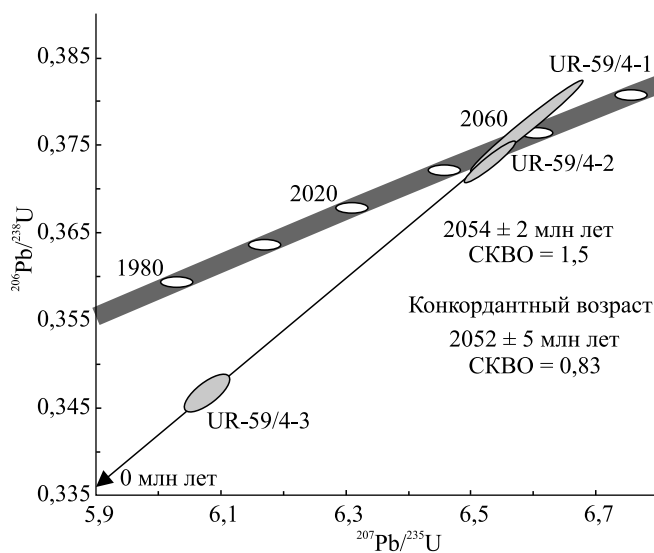


Рис. 2. Диаграмма $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}/^{238}\text{U}$ с конкордией и возрастом цирконов (обр. UR59/4) из жилы трондьемита, секущей мраморы центральноприазовской серии в разрезе на р. Берда.

предел формирования карбонатных осадков темрюкской свиты.

Изучение Rb–Sr-систематики в образцах мраморов темрюкской свиты проводили согласно процедуре [6], изучение Sm–Nd-систематики — в силикатных образцах согласно процедуре, разработанной для глинистых минералов [7]. Изотопный анализ элементов выполняли на многоколлекторном масс-спектраторе Triton TI. Среднее значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в стандартном карбонате Sr NIST SRM 987 в период работы дало значение $0,710275 \pm 0,000008$ (2σ , $n = 24$),

а среднее значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в изотопном стандарте jNd-1 — $0,512097 \pm 0,000008$ (2σ , $n = 5$).

Мраморы сложены крупнозернистым кальцитом и включают небольшую (3–11%) примесь кварца, амфибола, полевых шпатов, слюд. Карбонатная составляющая мраморов содержит 90–160 Mn, 1050–3900 Fe, 2340–3010 мкг/г Sr (табл. 1). Высокая концентрация Sr указывает, что исходный карбонатный осадок был сложен арагонитом. Концентрация Rb в карбонатной составляющей мраморов не превышает 0,61 мкг/г, а $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в ней заключено в узких пределах 0,70322–0,70352. Низкие содержания Fe, Mn в мраморах, а также зависимость концентрации Rb и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от доли силикатной примеси предполагают, что метаморфическая перекристаллизация этих пород происходила в закрытой или близкой к закрытой системе.

Образцы из силикатных прослоев содержат диоксид, амфибол, плагиоклаз, кварц. Высокие содержания MgO (8,9–9,4%), Ni, Co, Cr и низкие концентрации K_2O (0,3–0,6%) и REE свидетельствуют, что преобладающим источником терригенной составляющей были основные породы. Содержание Sm в силикатном материале 0,8–2,8, Nd — 3,6–13,8 мкг/г. Измеренное $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 0,51176–0,51194. Рассчитанный на основе изотопных Sm–Nd-данных модельный возраст силикатного материала (T_{DM}) = 2,31–2,34 млрд лет, а $\epsilon_{\text{Nd}} = 4,9$ –5,0 (табл. 1). Это подтверждает, что источником обломочного материала для силикатных метасадков служили раннепротерозойские магматические породы основного (базальтового) состава.

Отношения Mn/Sr (<0,2), Fe/Sr (<1,5) в карбонатной составляющей мраморов согласуются с таковыми для наименее перекристаллизованных осадочных карбонатных пород [8]. Предполагаемый изохимический характер метаморфизма позволяет использовать Sr-изотопную характеристику мраморов, метаморфизованных в условиях амфиболитовой фации, для оценки $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в среде отложения карбонатных осадков [9]. Сопоставление изотопной Sr-характеристики

мраморов (0,70322–0,70352) с вариациями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в океанах архея и протерозоя показывает, что карбонатные отложения центральноприазовской серии могли образоваться в начале палеопротерозоя 2,3–2,5 или ~2,1 млрд лет назад (рис. 3).

В геологической летописи интервал 2,06–2,23 млрд лет назад совпадает с ломагунди-ятулийской эпохой, когда отлагались карбонатные осадки с аномально высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ выше +8‰, вплоть до +18‰ [6, 10, 11]. Однако имеющиеся сведения об изотопном составе углерода в карбонатных породах Приазовского блока показывают, что значение $\delta^{13}\text{C}$ в кальцитовых мраморах на правом берегу р. Берда от +1,4 до +4,0‰ [2]. Таким образом, карбонатные породы центральноприазовской серии

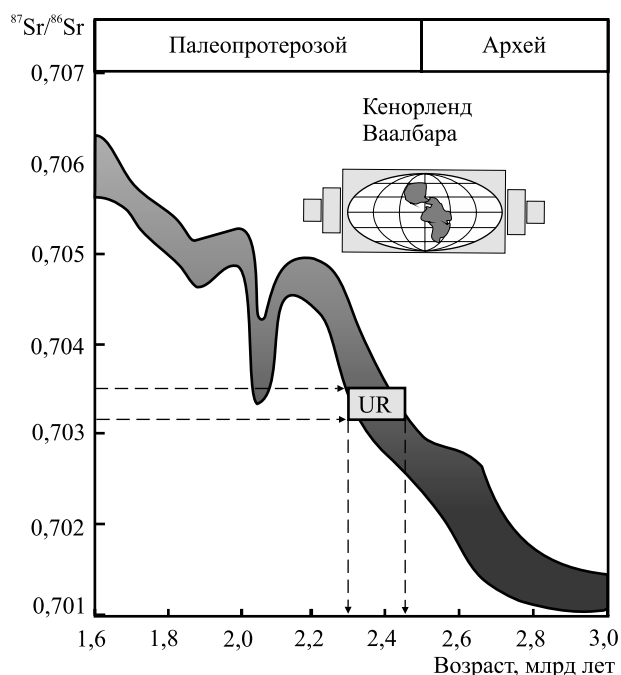


Рис. 3. Сравнение Sr-изотопной характеристики мраморов центральноприазовской серии с кривой вариаций $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в океане архея и палеопротерозоя [6, 8, 10, 11]. Хемотратиграфическая Sr-корреляция ограничивает один наиболее вероятный возрастной интервал в раннем палеопротерозое 2,3–2,45 млрд лет.

Таблица 1. Изотопная Rb–Sr-систематика кальцитовых мраморов и изотопная Sm–Nd-систематика силикатных осадков центральноприазовской серии, Приазовский блок Украинского щита (с. Калайтановка)

Образец	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Mn, мкг/г	Fe, мкг/г
UR59/5-7	0,13	2490	0,0002	0,70352	110	2250
UR59/8-3	0,21	2860	0,0002	0,70322	160	3900
UR59/9-3	0,61	3010	0,0006	0,70334	110	1050
UR59/10	0,16	2340	0,0002	0,70351	90	2080
	Sm, мкг/г	Nd, мкг/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	T_{NdDM} , млрд лет
UR59/8-5	2,89	14,3	0,1219	0,51175	5,0	2,31
UR59/9-4	0,82	3,70	0,1342	0,51193	4,9	2,34

отлагались до начала лomagунди-ятулийской эпохи. Следовательно, они должны быть древнее 2,23 млрд лет.

В заключение следует отметить, что внедрение трондьемитов, прорывающих мрамора темрюкской свиты (2052 ± 5 млн лет назад), совпадает с этапом интрузивного магматизма, игравшего важную роль в формировании континентальной коры Сарматии 2,07–2,05 млрд лет назад [12, 13]. Полученные изотопные Rb–Sr-, Sm–Nd-данные для мраморов и силикатных минералов ограничивают время отложения карбонатных осадков центральноприазовской серии Украинского щита узким интервалом 2,23–2,34 млрд лет. Таким образом, эта серия относится к раннему палеопротерозою. Однако она не является стратиграфическим аналогом терригенно-вулканогенно-карбонатной последовательности ятулия Балтийского щита [6, 14]. Это согласуется с реконструкциями, показавшими, что континентальные блоки Сарматия и Фенноскандия в палеопротерозое были значительно удалены друг от друга [15]. Наличие железистых кварцитов в разрезах Украинского щита и возраст карбонатных осадков Приазовского блока указывают на близость Сарматии к кратонам Каапвааль, Пилбара, составлявших основу древнего суперкратона Ваалбара [13].

Благодарности. Авторы выражают благодарность Г.В. Артеменко, Н.А. Арестовой, В.В. Балаганскому, А.В. Юрченко за участие в полевых исследованиях.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 18–17–00247).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lobach-Zhuchenko S.B., Balagansky V.V., Baltybaev Sh.K., Bibikova E.V., Chekulaev V.P., Yurchenko A.V., Arestova N.A., Artemenko G.V., Egorova J.S., Bogomolov E.S., Sergeev S.A., Skublov S.G., Presnyakov S.L. // *Precambrian. Res.* 2014. V. 252. P. 71–87.
2. Загнитко В.Н., Луговая. И.П. Изотопная геохимия карбонатных и железисто-кремнистых пород Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1989. 315 с.
3. Єсипчук К.Ю., Бобров О.Б., Степанюк Л.М., Щербак М.П., Глеваський Є.Б., Скобелев В.М., Дранник А.С., Гейченко М.В. Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита. Пояснювальна зап. Київ: УкрДГРІ, 2004. 29 с.
4. Бибилова Е.В., Лобач-Жученко С.Б., Артеменко Г.В., Клаэссон С., Коваленко А.В., Крылов И.Н. // *Петрология*. 2008. Т. 16. № 3. С. 227–247.
5. Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. Киев, 2008. 240 с.
6. Kuznetsov A.B., Melezhik V.A., Gorokhov I.M., Melnikov N.N., Konstantinova G.V., Kutayin E.P., Turchenko T.L. // *Precamb. Res.* 2010. V. 182. № 4. P. 300–312.
7. Горохов И.М., Мельников Н.Н., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В., Турченко Т.Л. // *Литология и полез. ископаемые*. 2007. № 5. С. 536–551.
8. Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2018. Т. 26. № 4. С. 3–25.
9. Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Ножкин А.Д., Азимов П.Я., Каурова О.К. // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2016. Т. 24. № 1. С. 3–22.
10. Bekker A., Kaufman A.J., Karhu J.A., Beukes N.J., Swart Q.D., Coetzee L.L., Eriksson K.A. // *Amer. J. Sci.* 2001. V. 301. P. 261–285.
11. Melezhik V.A., Fallick A.E., Kuznetsov A.B. // *Trans. Roy. Soc. Edinburgh: Earth Sci.* 2004. V. 95. № 3/4. P. 423–444.
12. Чернышов Н.М., Додин Д.А. // *Геология и геофизика*. 1995. Т. 36. № 1. С. 65–70.
13. Савко К.А., Самсонов А.В., Холин В.М., Базиков Н.С. // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2017. Т. 25. № 2. С. 3–26.
14. Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Мележик В.А., Горохов И.М., Васильева И.М., Гороховский Б.М. // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2007. Т. 15. № 4. С. 20–33.
15. de Kock M.O., Evans D.A.D., Beukes N.J. // *Precamb. Res.* 2009. V. 174. P. 145–154.

PALEOPROTEROZOIC AGE OF CARBONATES AND TRONDHJEMITES OF THE CENTRAL AZOV GROUP: Sr-ISOTOPE CHEMOSTRATIGRAPHY AND U–Pb GEOCHRONOLOGY

Corresponding Member of the RAS A. B. Kuznetsov, S. B. Lobach-Zhuchenko,
T. V. Kaulina, G. V. Konstantinova

Received June 4, 2018

The Sr-isotope composition of the Central Azov Group carbonates (0.70322–0.70352) and Nd model age of silicate sediments (2.34–2.31 Ga) has been reported. The U–Pb age of trondhjemite (2052±5 Ma) cutting the carbonates has been determined. According to the obtained data, the marine sedimentary cover of the Azov block making up the Early Precambrian Sarmatia Continent emplaced in the Early Paleoproterozoic at 2.23–2.34 Ga.

Keywords: Ukrainian Shield, Paleoproterozoic, Central Azov Group, Sr-isotope stratigraphy, U–Pb geochronology.

УДК 551.2

СВЯЗЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ВАРИАЦИЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Член-корреспондент РАН Б. В. Левин^{1,2,*}, Е. В. Сасорова²,
В. Б. Гурьянов¹, академик РАН В. В. Ярмолюк³

Поступило 28.05.2018 г.

Из анализа наблюдений за скоростью вращения Земли и ее вулканической активностью с 1720 по 2015 г. следует, что возрастание вулканической активности совпадает во времени с этапами уменьшения угловой скорости вращения (торможения) Земли. Уменьшение вулканической активности совпадает с увеличением угловой скорости вращения (разгоном). Используются материалы Каталога Смитсоновского института США, всего 160 сильных событий с $VEI \geq 4$ (в том числе 25 событий с $VEI \geq 5$). В настоящее время (с 2006 г.) Земля вступила в новую стадию торможения, и уже обнаруживается тенденция к усилению активности ряда катастрофических природных процессов.

Ключевые слова: вулканизм, активность, индекс вулканической эксплозивности (VEI), угловая скорость вращения Земли, стадия торможения, стадия ускорения.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846729-733>

По наблюдениям последних лет ряд катастрофических природных явлений характеризуется ярко выраженным неравномерным распределением в пространстве и времени. Связь сейсмической активности (СА) и изменений относительной угловой скорости вращения Земли (ОСВЗ) ранее показана в работах [1–5]. Цель настоящей работы — сопоставление вулканической активности (ВА) и угловой скорости вращения Земли. Для проведения такого анализа необходимо иметь длинные ряды наблюдений за ВА и ОСВЗ.

Для анализа ВА планеты был скомпилирован рабочий каталог вулканических извержений на базе сайта Смитсоновского института США [6]. Представленный каталог содержит последовательный перечень всех вулканических извержений мира, для каждого из которых определяется индекс вулканической эксплозивности (Volcano Explosive Index, VEI).

В зависимости от мощности произошедшего события индекс VEI принимает значения от 0 до 8. Более или менее достоверной можно считать информацию об извержениях с $VEI \geq 4$, оказавших заметное воздействие на среду обитания человека

и задокументированных в исторических хрониках. Сильные события характеризуются величиной $VEI = 4$ и 5, катастрофические события оцениваются значениями $VEI = 6$ и 7. Для анализа данных нами были отобраны вулканические извержения за период с 1720 г. по настоящее время со значениями $VEI \geq 4$. Всего было отобрано 160 событий (из них 135 событий с $VEI = 4$, 20 событий с $VEI = 5$, четыре события с $VEI = 6$ и одно событие с $VEI = 7$).

Для создания рабочего каталога по вариациям скорости вращения Земли были адаптированы два источника данных. Это общедоступные данные агентства [7], ежесуточные наблюдения за изменениями длительности суток с 1962 по 2016 г. и таблицы, представленные в работах [8, 9]. Каталоги имеют период перекрытия (1962–1984 гг.). Во втором источнике собраны данные за период 1657–1984 гг. с частотой наблюдения один раз в полгода. В этом источнике с 1657 по 1720 г. были частые пропуски наблюдений, поэтому мы использовали данные только с 1720 г. (почти 300 лет). Из двух источников был скомпилирован рабочий каталог за период 1720–2017 гг. с частотой наблюдений раз в полгода.

В рассматриваемых источниках представлены значения LOD (Length of Day). Далее был скомпилирован временной ряд для ОСВЗ, собранный из значений LOD, определяемых как разность величин периодов ($P_z - P_a$), где P_a — период астрономических суток (86 400 с), а P_z — зарегистрированный период земных суток (P_z и P_a измерены в миллисекундах). Относительная вариация угловой скорости определяется как относительное изменение

¹ Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Южно-Сахалинск

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва

³ Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: levinbw@mail.ru

угловой скорости, выраженное через их периоды: $v = (w - W)/W \approx -(P_z - P_a)/P_a$ и оценивается величиной $v = 8 \cdot 10^{-8}$ [10].

Далее использовались временные ряды по ВА и ОСВЗ одинаковой длительности с 1720 г. по настоящее время. Первое с 1720 г. из зафиксированных извержений с $VEI \geq 4$ датируется 1721 г., последнее датируется 29.05.2015 г.

В работе [3] с помощью спектрального анализа были выделены характерные периоды для временного ряда значений v . Для низкочастотной составляющей это 63, 32 и 23 года; для среднечастотной составляющей 1 год и полгода, а для высокочастотной составляющей 13,6 и 28 сут. Для данной работы интерес представляет в основном низкочастотная составляющая.

На рис. 1 представлены данные наблюдений (временной ряд) по относительной скорости вращения Земли v с 1720 по 2017 г. и значения V_n — низкочастотной составляющей ОСВЗ, которая включает периоды более 10 лет. Анализ временного ряда V_n позволяет отметить периоды уменьшения угловой скорости вращения (торможения), например с 1729 по 1766 г., с 1831 по 1854 г., и самый значительный период торможения за всю историю наблюдений с 1878 по 1916 г. За периодами торможения следуют периоды увеличения угловой скорости (ускорение вращения планеты). Переход от стадии ускорения к стадии торможения (и наоборот), как правило, сопровождается значительными и очень резкими колебаниями угловой скорости. Суммарная дли-

тельность этих колебаний может составлять несколько лет. Эти участки временного ряда названы переходными зонами. С 2006 г. наша планета вступила в новую стадию торможения, которая продолжается и в настоящее время.

На рис. 1 отмечены линиями со стрелками 1–5 начальные стадии сильнейших извержений (с $VEI = 6$ или 7) за последние 300 лет. Следует отметить, что начало всех выделенных извержений приходится на стадию торможения угловой скорости. Извержения, помеченные номерами 1, 2, 3 и 4, начинались в переходных зонах.

Далее, в рабочем каталоге были выделены извержения вулканов с $VEI = 5$, начальные этапы извержений были положены на временную ось с дискретностью 0,5 года (рис. 2).

Извержения представлены вертикальными линиями 2, на этом же рисунке представлен временной ряд значений V_n (1). В верхней части рисунка отмечены периоды торможения 3 и ускорения 4 для низкочастотной составляющей V_n угловой скорости вращения Земли. Нетрудно заметить, что большинство извержений с $VEI = 5$ (17 из 20, или 85%) начинается в период торможения или в переходный период. Три извержения, которые приходятся на период ускорения угловой скорости, это Cerro, 1916; St Helen, 1980; Chichon, 1982.

Посчитаны коэффициенты корреляции между относительной угловой скоростью вращения Земли v и вулканической активностью. Для этого извержения за период с 1700 по 2017 г. с $VEI \geq 4$ были

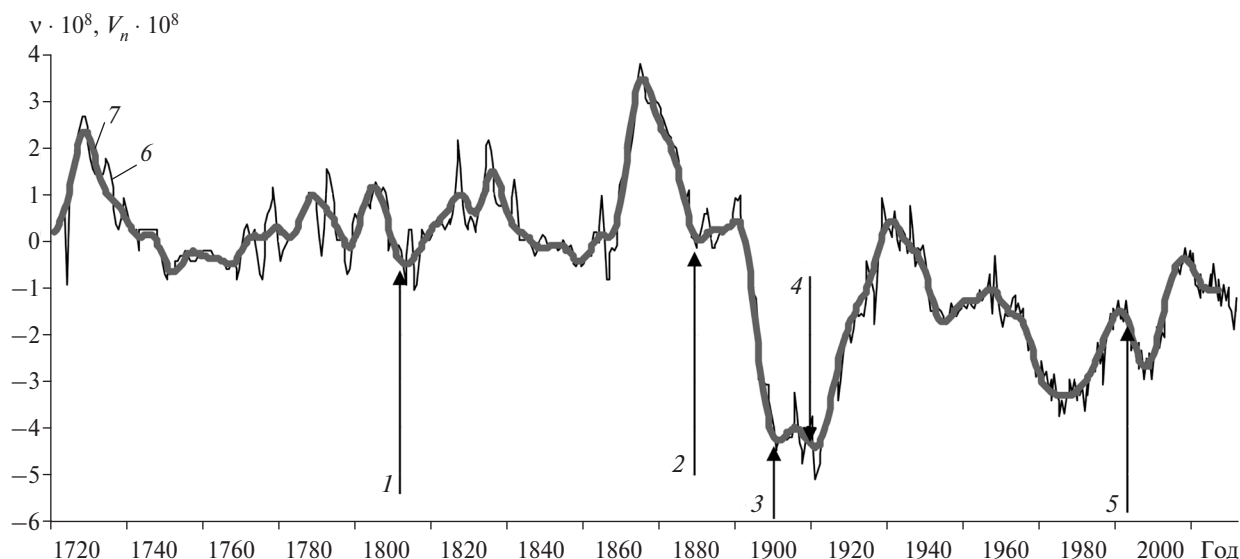


Рис. 1. Временные ряды значений v (ОСВЗ) и значений V_n — (низкочастотной составляющей ОСВЗ) за период 1720–2017 гг. Вертикальные линии 1–5 со стрелками — начальные стадии сильнейших извержений за последние 300 лет (1 — вулкан Tambora (1812 г.), 2 — Krakatau (1883 г.), 3 — Santa Maria (1902 г.), 4 — Novarupta (1912 г.), 5 — Pinatubo (1991 г.)), 6 — значения v , 7 — значения V_n .

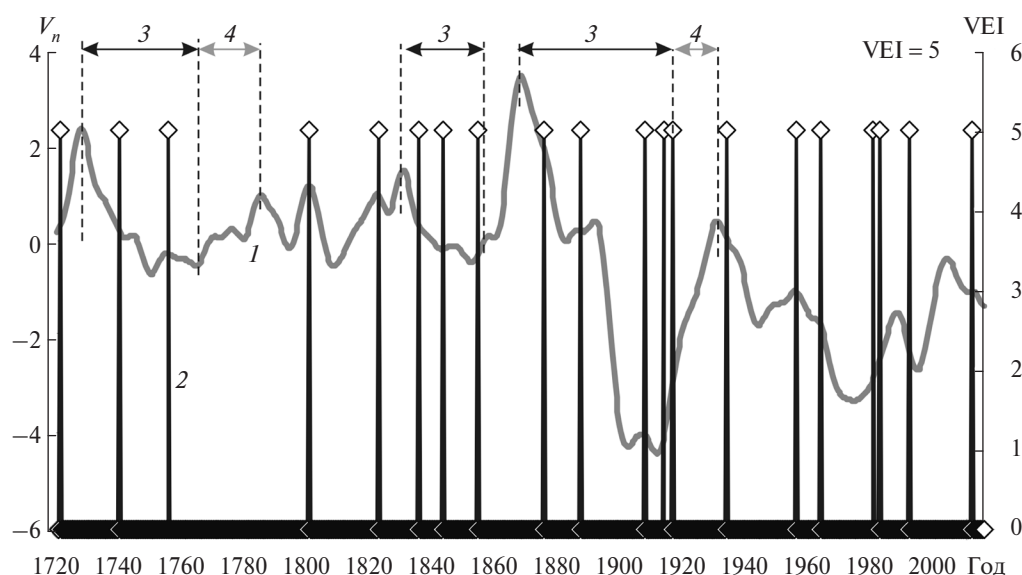


Рис. 2. Временной ряд значений V_n и извержения вулканов с $VEI = 5$, расположенные на временной оси за период 1720–2017 гг. 1 — значения V_n , 2 — начало извержений. Горизонтальные линии со стрелками 3, 4 определяют границы стадий торможения (3) и ускорения вращения Земли (4).

положены на временную ось. Полученный временной ряд был обработан методом скользящего среднего с размером окна 15 и 30 лет. Для вычисленного таким образом ряда усреднённой вулканической активности (УВА) и ряда со значениями v были посчитаны коэффициенты корреляции K_t (t — размер усредняющего окна).

На рис. 3 представлены оба ряда для значения $t = 15$ и 30 лет. Наличие отрицательной корреляции между двумя временными рядами можно отметить сразу после визуального сравнения временных рядов. Вычисленные значения K_{15} и K_{30} оказались равными $-0,549$ и $-0,588$ соответственно. Далее ряды $УВА_{15}$ и $УВА_{30}$ сдвигались относительно ряда со значениями v , и при каждом сдвиге значения K_t пересчитывались. Всего выполнено по 25 сдвигов для каждого окна. После нескольких сдвигов абсолютная величина K_t начинает резко уменьшаться для обоих окон. Максимум $|K_{15}|$ достигается при сдвиге на 3,5 года, а для $|K_{30}|$ — при сдвиге на два года.

На рис. 4 дана гистограмма распределения вулканических извержений по пятилетним интервалам за период с 1720 по 2017 г. Визуальный анализ гистограммы на рис. 4 позволяет отметить существенное увеличение количества вулканических извержений за период с 2006 по 2015 г. Вариации значений v и V_n (рис. 1) показывают, что с 2006 г. Земля вступила в стадию уменьшения угловой скорости вращения, соответственно должна увеличиваться её ВА.

В табл. 1 представлены данные по количеству извержений и суммарному значению VEI за два пе-

риода наблюдений: с 2000 по 2005 г. (предыдущая стадия ускорения угловой скорости) и с 2006 по 2017 г. (текущая стадия торможения). Вулканическая активность за период 2006–2017 гг. возрастает почти в 3 раза (2,8 раза). Следует отметить, что в настоящее время стадия торможения не окончена, она ещё продолжается.

Результатом настоящей работы является нахождение взаимосвязи между вариациями угловой скорости и степенью вулканической активности. Замедление скорости вращения планеты (этап торможения) приводит к росту вулканической активности, и наоборот, увеличение скорости вращения Земли вызывает уменьшение ВА. Показана отрицательная корреляция между ВА и ОСВЗ. Эта связь была частично описана в [11].

Ранее подобная взаимосвязь между вариациями угловой скорости и степенью глобальной сейсмической активности была показана в работах [12, 13]. В настоящее время Земля вступила в стадию торможения и ряд катастрофических геофизических процессов имеет тенденцию к усилению.

Таблица 1. Сравнительные данные по количеству извержений и суммарному значению VEI за два периода наблюдений

Период наблюдений	2000–2005 гг.	2006–2017 гг.
Количество извержений за период (n)	5 (n_1)	14 (n_2)
Суммарное значение VEI	20	57
n_2/n_1	2,8	2,8
Сум. $VEI-2/VEI-1$	2,85	2,85

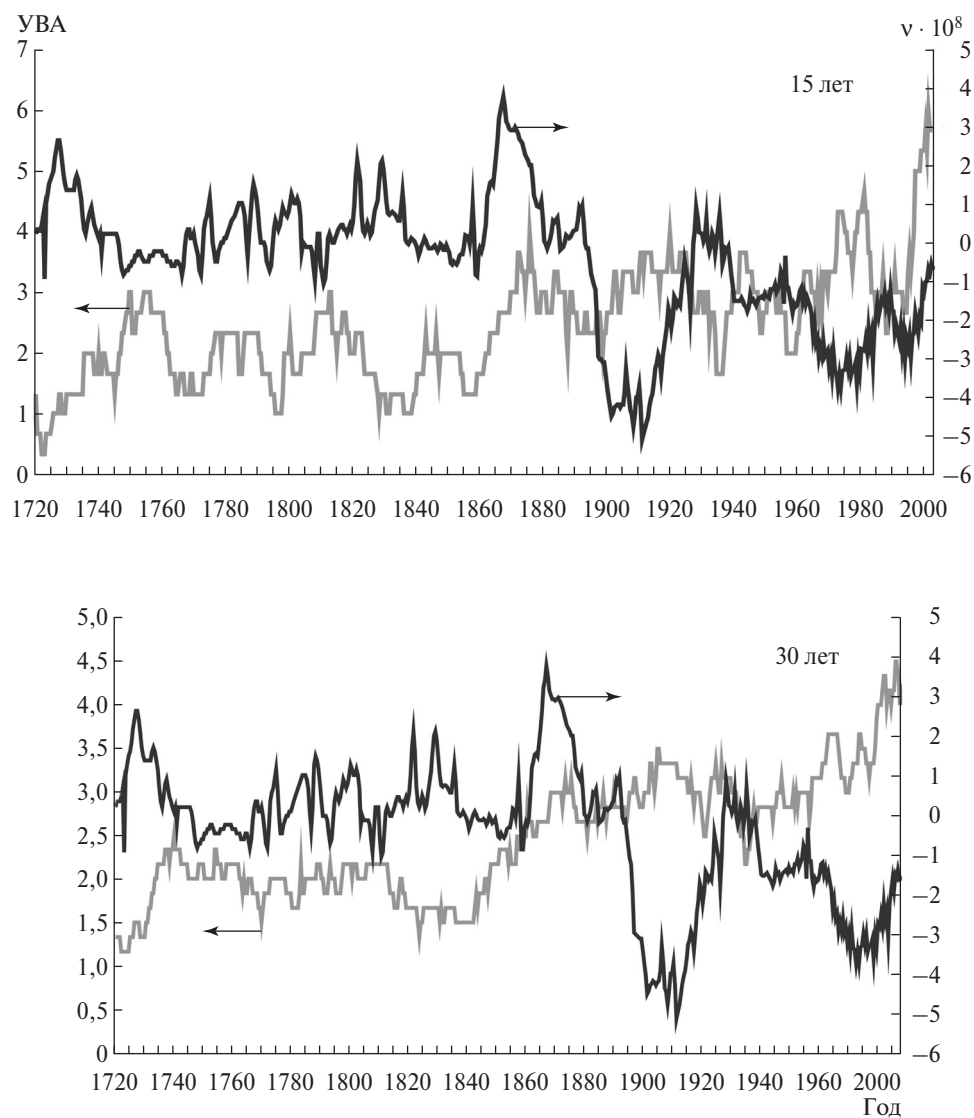


Рис. 3. Сопоставление вариаций относительной угловой скорости вращения Земли v и усредненного ряда вулканической активности УВА для скользящего окна в 15 и 30 лет. Дискретность временной шкалы 0,5 года.

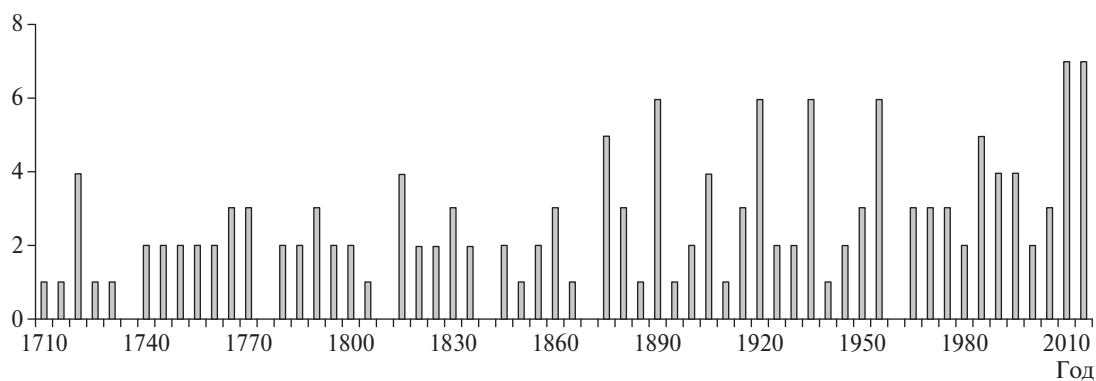


Рис. 4. Распределение вулканических извержений по пятилетним интервалам за период с 1720 по 2017 г. По оси ординат — количество извержений с $VEI \geq 4$ за пятилетний интервал.

Источник финансирования. Работа выполнена в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, и Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва. Работа выполнялась в рамках госзадания № 0149–2018–0015 (ИО РАН) и № 0285–2018–0014 (ИМГиГ ДВО РАН), Россия, и частично поддержана грантом РФФИ № 16–05–00089.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sasorova E.V., Levin B.W.* // J. Geogr. and Geol. 2018. V. 10. № 2. DOI: 10.5539/igg.v10n2p43.
2. *Сасорова Е.В., Левин Б.В.* // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2017. № 4 (20). С. 91–100. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-91-100.
3. *Левин Б.В., Сасорова Е.В.* // ДАН. 2015. Т. 464. № 3. С. 351–355. DOI: 10.7868/S0869565215270183.
4. *Varga P., Gambis D., Bus Z., Bizouard Ch.* Journees 2004 — systèmes de référence spatio temporels. Fundamental Astronomy: New Concepts and Models for High Accuracy Observations. Paris, September 20–22, 2004. P.: Observ. Paris, 2005. P. 115–120.
5. *Zheng Dawei, Zhou Yonghong* // Acta Seismol. Sin. 1995. V. 8. № 1. P. 31–37.
6. Каталог Смитсоновского института США. http://Volcano.si.edu/gvp_about.cfm
7. International Earth Rotation and Reference System Service. <http://iers.org>
8. *McCarthy D.D., Babcock A.K.* // Phys. Earth and Planet. Interiors. 1986. V. 44. P. 281–292.
9. *Morrison L.V.* // Nature. 1973. V. 241. P. 519–520.
10. *Сидоренков Н.С.* Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Наука/Физматлит, 2002. 384 с.
11. *Levin B.W., Sasorova E.V., Gurianov V.B., Rybin A.V., Yarmoljuk V.V.* EGU General Assembly // Geophys. Res. Abstrts. 2018. V. 20. EGU2018-3814.
12. *Bendick R., Bilham R.* // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. DOI: 10.1002/2017GL074934.
13. *Levin B.W., Sasorova E.V., Steblov G.M., Doman-ski A.V., Prytkov A.S., Tsyba E.N.* // Geodesy and Geodyn. 2017. V. 8. P. 206–212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.007>

THE RELATIONSHIP BETWEEN GLOBAL VOLCANIC ACTIVITY AND VARIATIONS IN THE VELOCITY OF EARTH'S ROTATION

Corresponding Member of the RAS **B. W. Levin, E. V. Sasorova,**
V. B. Gurianov, Academician of the RAS V. V. Yarmolyuk

Received May 28, 2018

Analysis of observations of the Earth's rotational velocity and volcanic activity of the planet from 1720 until 2015 suggests that higher volcanic activity temporally coincided with periods of decreased angular velocity of Earth's rotation (deceleration), and, vice versa, lower volcanic activity coincided with the periods of increased velocity of the Earth's rotation (acceleration). Our analysis employed the data from the catalog by the Smithsonian Institute, United States, in which each volcanic explosion had its own determined value of the Volcanic Explosivity Index (VEI). The total number of selected intensive eruptions with $VEI \geq 4$ was 160, including 25 eruptions with $VEI \geq 5$. At present (beginning from 2006), the Earth was entry in a deceleration phase and series of catastrophic eruptions reveals the tendency toward intensifying volcanic activity.

Keywords: volcanic activity, Volcanic Explosivity Index, angular velocity of the Earth, braking stage, acceleration stage.

УДК 551.552:550.4

**ЭКЗОТИЧЕСКИЙ ИНИМСКИЙ БЛОК
АРГУНСКОГО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО МАССИВА
ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА:
РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ (LA-ICP-MS)
U–Th–Pb- И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ
Sm–Nd-ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Р. О. Овчинников¹, А. А. Сорокин¹, А. Б. Котов², Е. Б. Сальникова²,
В. П. Ковач², член-корреспондент РАН А. П. Сорокин^{1,*}**

Поступило 17.05.2018 г.

В результате проведённых исследований установлено, что возраст протолитов гранатсодержащих биотит-серицит-мусковитовых сланцев Инимского блока не превышает 991 млн лет, а их источниками послужили породы нео-, мезо- и палеопротерозойской и архейской континентальной коры. Это позволяет предполагать, что по отношению к Аргунскому массиву Инимский блок является экзотическим. Такое предположение обусловлено тем, что значительный вклад в формирование протолитов слагающих его метаосадочных пород внесли продукты разрушения раннедокембрийской континентальной коры, присутствие которой в пределах Аргунского массива не доказано. Не исключено, что Инимский блок — фрагмент Джугджуро-Станового супертеррейна, имплантированный в структуру Аргунского массива в результате мезозойских тектонических событий.

Ключевые слова: Инимский блок, Аргунский супертеррейн, Центрально-Азиатский складчатый пояс, сланцы, докембрий.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846734-738>

Аргунский (Аргун-Идермегский) континентальный массив (супертеррейн) — один из главных структурных элементов восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (рис. 1). Согласно существующим представлениям [2] наиболее древними (архейскими) образованиями этого массива являются метаморфизованные в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации осадочные, вулканические породы гонжинской серии и рассланцованные в условиях амфиболитовой фации диориты, кварцевые диориты, гранодиориты бекетского, граниты гонжинского комплексов. К более высокому, палеопротерозойскому (по [2]) или неопротерозойскому (по [1]), структурному этажу Аргунского массива относят слабометаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения чаловской серии и гранитоиды чаловского комплекса.

Метаморфические породы гонжинской, чаловской серий слагают небольшие тектонические блоки

(Гонжинский, Путакский, Инимский), которые обычно рассматривают как выходы раннедокембрийского фундамента Аргунского массива [2]. Однако полученные к настоящему времени геохронологические и изотопно-геохимические данные свидетельствуют о том, что протолиты метаосадочных, метавулканических пород гонжинской серии Гонжинского блока и наложенные на них структурно-метаморфические преобразования имеют не раннедокембрийский, а мезозойский возраст [3–5]. Кроме того, установлено, что в метапесчаниках чаловской серии Гонжинского блока наиболее молодые детритовые цирконы имеют ордовикский возраст [6]. Это в совокупности с данными о возрасте метадацитов исагачинской толщи чаловской серии Гонжинского блока (476 ± 8 млн лет [7]) свидетельствует о её ордовикском возрасте. Недавно показано, что этот блок — структура, подобная комплексам метаморфических ядер кордильерского типа [4].

В то же время в палеозойских, мезозойских осадочных породах Аргунского массива обнаружены неопротерозойские обломочные цирконы [6, 8, 9]. Это позволяет предполагать, что в его пределах или его обрамлении присутствуют неопротерозойские магматические комплексы. В этой связи мы провели

¹ Институт геологии и природопользования
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Благовещенск

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

*E-mail: Ovchinnikov@ignm.ru

геохронологические U—Th—Pb-исследования детритовых цирконов из метаосадочных пород Инимского блока, расположенного в центральной части Аргунского массива (рис. 1).

В строении Инимского блока преобладают гнейсы, кристаллические сланцы, которые относят к архейской игагской свите гонжинской серии [2] или к исагачинской свите неопротерозойской чаловской серии [1]. Геохимические особенности метаморфических пород Инимского блока свидетельствуют об осадочном происхождении их протолитов.

Для геохронологических U—Th—Pb-исследований (LA-ICP-MS) использован образец R-78 гранатосодержащего биотит-серицит-мусковитового сланца Инимского блока. Выделение циркона выполнено в минералогической лаборатории ИГиП ДВО РАН (г. Благовещенск) по стандартной методике с помощью тяжёлых жидкостей. Геохронологические U—Th—Pb-исследования цирконов проведены в Геохронологическом центре аризонского университета на ICP масс-спектрометре Thermo Element 2, оснащённом системой лазерной абляции Photon Machines Analyte G2, по методике, представленной на сайте лаборатории (www.laserchron.org). Конкордантные возрасты цирконов рассчитаны с использованием программы Isoplot v. 4.15 [10]. При построении гистограммы и кривой относительной вероятности возраста цирконов [11] принимали во внимание только конкордантные оценки их возраста.

Изотопные Sm—Nd-исследования выполнены в ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург). Изотопные составы Sm, Nd определены на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI в статическом режиме. Измеренные $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ нормализованы к $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$ и приведены к $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512115$ в Nd-стандарте JNdi-1. Средневзвешенное значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в Nd-стандарте JNdi-1 за период измерений составило $0,512102 \pm 6$ ($n = 8$). Точность определения концентраций Sm, Nd $\pm 0,5\%$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \pm 0,5\%$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 0,005\%$ (2σ). Уровень холостого опыта не превышал 0,2 нг Sm, 0,5 нг Nd. При расчёте величин $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ и модельных возрастов $t_{\text{Nd(DM)}}$ использованы современные значения однородного хондритового резервуара (CHUR) по [12] и деплетированной мантии (DM) по [13].

Геохронологические U—Th—Pb-исследования выполнены для 111 зёрен детритовых цирконов из гранатосодержащего биотит-серицит-мусковитового сланца (рис. 2а). Для них получено 44 конкордантных и субконкордантных оценок возраста 932—1069 млн лет. На кривой вероятности распределения конкордантных возрастов отчётливо выделяется пик, соответствующий 991 млн лет (рис. 2б),

который в первом приближении определяет нижнюю возрастную границу накопления протолита гранатосодержащего биотит-серицит-мусковитового сланца. Для остальных детритовых цирконов из гранатосодержащего биотит-серицит-мусковитового сланца получены оценки возраста (дискордантность 5—20%) 925—1018 ($n = 18$), 1052—1466 ($n = 34$), 1627—1940 млн лет ($n = 13$). И два зерна циркона имеют возраст (по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) ~2374 и 2524 млн лет.

Как видно из табл. 1, оценки Nd модельного возраста ($t_{\text{Nd(DM)}}$) гранатосодержащих биотит-серицит-мусковитовых сланцев Инимского блока 3,0—2,3 млрд лет. Результаты эти неожиданные. Во-первых, опубликованные к настоящему времени данные свидетельствуют о том, что палеозойские и мезозойские магматические, осадочные комплексы Аргунского массива характеризуются мезопротерозойскими значениями Nd модельных возрастов $t_{\text{Nd(DM)}} = 1,5\text{—}1,0$ млрд лет [5, 8, 9]. Во-вторых, в породах палеозойских, мезозойских осадочных последовательностей Аргунского массива доля обломочных цирконов древнее неопротерозоя очень мала [6, 8, 9], что ставит под сомнение наличие раннедокембрийского фундамента в его строении.

С другой стороны, обращает на себя внимание сходство Nd модельных возрастов метаосадочных пород Инимского блока и реперных магматических, метаморфических комплексов Джугджуро-Станового супертеррейна ($t_{\text{Nd(DM)}} = 3,2\text{—}2,0$ млрд лет [14, 15]), отделённого от Аргунского массива Монголо-Охотским складчатым поясом.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что возраст протолитов гранатосодержащих биотит-серицит-мусковитовых сланцев Инимского блока не более 991 млн лет, а их источниками послужили породы нео-, мезо-, палеопротерозойской и архейской континентальной коры. Это позволяет предполагать, что по отношению к Аргунскому массиву Инимский блок является экзотическим. Такое предположение обусловлено тем, что значительный вклад в формирование протолитов слагающих его метаосадочных пород внесли продукты разрушения раннедокембрийской континентальной коры, присутствие которой в пределах Аргунского массива не доказано. Не исключено, что Инимский блок — фрагмент Джугджуро-Станового супертеррейна, имплантированный в структуру Аргунского массива в результате мезозойских тектонических событий.

Источник финансирования. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17—35—50064-мол-нр).

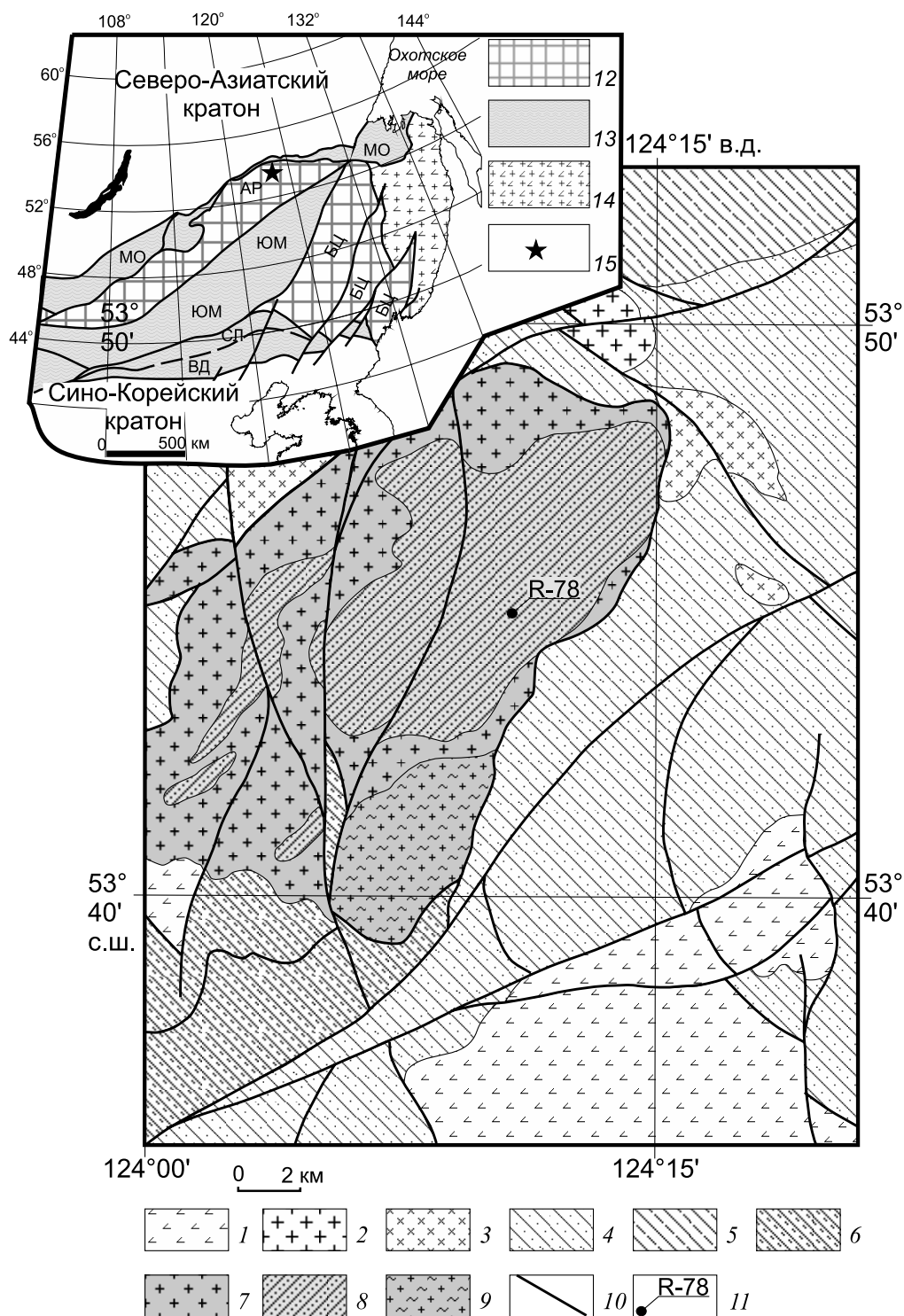


Рис. 1. Геологическая схема Инимского блока Аргунского континентального массива. Составлена по [1]. 1 — нижне-меловые вулканические и вулканогенно-осадочные отложения; 2 — раннемеловые гранитоиды; 3 — позднеюрские (?) гранитоиды; 4 — среднеюрские терригенные отложения; 5 — ниже- и ниже-среднеюрские терригенные отложения; 6 — верхнетриасовые (?) терригенные отложения; 7–9 — породы Инимского блока: 7 — неопротерозойские (?) гнейсовидные гранитоиды чаловского комплекса, 8 — неопротерозойские (?) гнейсы и сланцы чаловской серии, 9 — архейские (?) гнейсовидные граниты; 10 — разломы; 11 — место отбора образца для геохронологических U–Th–Pb-исследований и его номер. Врезка: положение Инимского блока в структурах восточной части Азии: 12 — континентальные массивы — супертеррейны (АР — Аргунский, БЦ — Буреинско-Цзямусинский); 13 — палеозойские—раннемезозойские складчатые пояса (ЮМ — Южно-Монгольско-Хинганский, СЛ — Солонкерский, ВД — Вундурмиао); 14 — позднеюрско-раннемеловые орогенные пояса; 15 — район исследования.

Таблица 1. Результаты изотопных Sm–Nd-исследований гранатсодержащих биотит-серицит-мусковитовых сланцев Инимского блока

Номер образца	Sm, мкг/г	Nd, мкг/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} (\pm 2\sigma_{\text{изм.}})$	$\epsilon_{\text{Nd}(0)}$	$\epsilon_{\text{Nd}(1,0)}$	$t_{\text{Nd(DM)}}$, млн лет
C-1253	3,02	14,38	0,1268	$0,511401 \pm 5$	–24,1	–15,2	3050
C-1253-1	5,81	33,8	0,1040	$0,511479 \pm 2$	–22,6	–10,8	2312
R-77	3,85	21,4	0,1089	$0,511364 \pm 2$	–24,9	–13,7	2586
R-78	3,22	16,46	0,1184	$0,511409 \pm 3$	–24,0	–14,0	2768

Примечание. Величины ошибок определения отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ соответствуют последним значащим цифрам после запятой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев С.К. Государственная геологическая карта РФ 1:200 000. 2-е изд. Зейская серия. Лист N-51-XXIII (Невер), N-51-XXIX (Осежино). СПб.: ВСЕГЕИ, 2002.
2. Петрук Н.Н., Козлов С.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Лист N-51 (Сковородино). Третье поколение. Дальневосточная серия / Под ред. А.С. Вольского. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009.
3. Котов А.Б., Сорокин А.А., Сальникова Е.Б. и др. // ДАН. 2009. Т. 429. № 6. С. 779–783.
4. Котов А.Б., Мазукабзов А.М., Сковитина Т.М. и др. // Геотектоника. 2013. № 5. С. 48–60.
5. Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П. и др. // ДАН. 2012. Т. 444. № 5. С. 519–522.
6. Смирнова Ю.Н. Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы тектонического совещания // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2018. Т. 1. С. 202–205.
7. Сорокин А.А., Смирнов Ю.В., Котов А.Б. и др. // ДАН. 2014. Т. 457. № 3. С. 323–326.
8. Сорокин А.А., Смирнова Ю.Н., Котов А.Б. и др. // Геохимия. 2015. № 6. С. 539–550.
9. Смирнова Ю.Н., Сорокин А.А., Попеко Л.И. и др. // Геохимия. 2017. № 2. С. 127–148.
10. Ludwig K. Isoplot 3.6: Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ. 2008. № 4. 77 p.
11. Gehrels G. Detrital Aircon U–Pb Geochronology: Current Methods and New Opportunities. In: Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. Wiley-Blackwell, 2011. P. 47–62.
12. Jacobsen S.B., Wasserburg G.J. // Earth and Planet Sci. Lett. 1984. V. 67. P. 137–150.
13. Goldstein S.J., Jacobsen S.B. // Earth and Planet Sci. Lett. 1988. V. 87. P. 249–265.
14. Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. // ДАН. 2011. Т. 438. № 3. С. 355–359.
15. Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. // ДАН. 2012. Т. 444. № 4. С. 402–406.

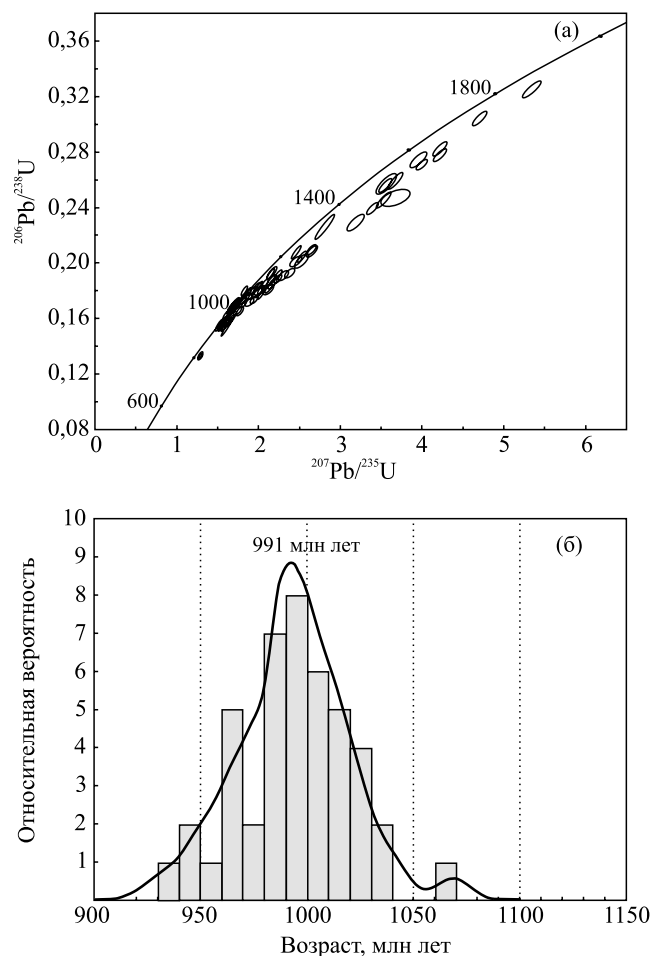


Рис. 2. Диаграмма с конкордией (а), кривая относительной вероятности и гистограмма возрастов детритовых цирконов (б) из гранатсодержащих биотит-серицит-мусковитовых сланцев (R-78) Инимского блока.

**THE EXOTIC INIM BLOCK OF THE ARGUN CONTINENTAL
SUPERTERRANE OF THE CENTRAL ASIAN FOLD BELT: RESULTS
OF U–Th–Pb GEOCHRONOLOGICAL (LA-ICP-MS) AND Sm–Nd
ISOTOPIC-GEOCHEMICAL STUDIES**

**R. O. Ovchinnikov, A. A. Sorokin, A. B. Kotov, E. B. Sal'nikova,
V. P. Kovach, Corresponding Member of the RAS A. P. Sorokin**

Received May 17, 2018

The results of studies indicate that the age of the protoliths of garnet-bearing biotite–sericite–muscovite schists of the Inim Block is <991 Ma, and they are derived from rocks of the Neo-, Meso-, and Paleoproterozoic (as well as Archean) crust. This suggests that the Inim Block is exotic relatively to the Argun Superterrane due to the formation of the protolith of its metasedimentary rocks largely from erosion products of the Early Precambrian continental crust, the presence of which within the Argun Superterrane is not proven. It is not excluded that the Inim Block is a fragment of the Dzhugdzhur–Stanovoi Superterrane implanted in the structure of the Argun Superterrane as a result of Mesozoic tectonic events.

Keywords: Inim Block, Argun Superterrane, Central Asian Fold Belt, schists, Precambrian.

УДК 551.253:551.24.035

**ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ И ВОЗРАСТЕ ПРОТОЛИТА
ВЫСОКОБАРИЧЕСКИХ ТЕКТОНИТОВ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА:
СВЯЗЬ С РАННИМ ЭТАПОМ ФОРМИРОВАНИЯ
ПАЛЕОАЗИАТСКОГО ОКЕАНА**

И. И. Лиханов^{1,*}, К. А. Савко²

Представлено академиком РАН Н.П. Похиленко 08.11.2016 г.

Поступило 03.10.2016 г.

Петрогеохимические характеристики высокобарических мафических тектонитов Приенисейской сдвиговой зоны Енисейского кряжа свидетельствуют о том, что их протолитами являлись базальты типа N-MORB и E-MORB с возрастом $701,6 \pm 8,4$ млн лет. Образование более примитивных по химическому составу N-MORB-базальтов происходило на начальных этапах спрединга, когда плавлению подвергались верхние горизонты деплетированной мантии. Более высокотитанистые базальты образовались как продукты плавления обогащённого мантийного субстрата на более поздних этапах спрединга. Эти события фиксируют ранний этап развития Палеоазиатского океана на западной окраине Сибирского кратона.

Ключевые слова: геохимия, протолит, U–Pb SHRIMP-II-датирование по циркону, Енисейский кряж, Палеоазиатский океан.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846739-744>

В докембрийской истории Енисейского кряжа офиолитовые и островодужные комплексы Исаковского и Предивинского террейнов были вовлечены в процессы формирования конвергентной границы “кордильерского типа”, контролируемой субдукцией океанической коры под активную континентальную окраину [1]. Об этом свидетельствует обнаружение реликтов глаукофановых сланцев в высокобарических тектонитах Приенисейской сутурной зоны [2] и существенное влияние субдукционной компоненты при формировании пород океанической коры в регионе [3]. Однако вопросы пространственно-временных корреляций этих докембрийских террейнов с развитием Палеоазиатского океана и их последующей аккрецией к Сибирскому кратону далеки от окончательного решения [4]. В этой связи мы провели геохимическое и геохронологическое изучение высокобарических пород из тектонического меланжа сдвиговой зоны с целью реконструкции состава, геодинамической природы и возраста их протолитов.

Объект исследования работ расположен на северо-западе Заангарья Енисейского кряжа в преде-

лах Приенисейской региональной тектонической зоны (ПРТЗ) [5]. Она тесно связана с Байкало-Енисейским разломом, протягиваясь вдоль западной окраины Сибирского кратона не менее чем на 200 км при ширине 30–50 км. Её структура — система сближенных субпараллельных разломов сдвиговой, надвиговой кинематики с проявлениями приразломного катаклаза, меланжирования, динамометаморфизма [6]. В районе исследования в её строении выделяют 3 крупных докембрийских блока (с востока на запад): континентальный гнейсо-амфиболитовый, метаофиолитовый метабазит-ультрабазитовый, вулканоплутонический [2]. Первый блок сложен породами гаревского метаморфического комплекса, в составе которого наиболее распространены биотитовые плагиогнейсограниты немтихинской толщи, порфиробластические гранитогнейсы и кристаллические сланцы малогаревской толщи [7]. Последние два блока относятся к Исаковскому террейну, аккретировавшему в венде к Сибирскому континенту [1, 8]. Офиолитовые ассоциации второго блока представлены амфиболизированными толеитовыми метабазами и метабазит-ультрабазитами. Вулканоплутонический островодужный блок преимущественно сложен породами метадацит—андезит—базальтовой ассоциации [2].

Эти породы входят в состав субдукционно-аккреционного комплекса, где встречаются в виде

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

² Воронежский государственный университет

*E-mail: likh@igm.nsc.ru

тектонических пластин, линз или блоков в серпентинитовом меланже. Тектонический меланж разновозрастных и разномасштабных блоков высоко- и слабометаморфизованных пород разного состава свидетельствует о неоднократной реактивизации ПРТЗ в неопротерозое [9].

Породы, локализованные в тектоническом шве поздненеопротерозойского возраста на границе кратона с островодужно-океаническим террейном, испытали два этапа метаморфизма. На первом этапе сформировались глаукофановые сланцы при *PT*-параметрах ~8–9 кбар/400 °С. На втором этапе они подверглись синэксгумационному динамометаморфизму вендского (~600 млн лет) возраста с ростом давления на 3–5 кбар и температуры на 180–240 °С [2]. Верхняя возрастная граница их формирования ограничена внедрением субщелочных лейкогранитов гранитов Осиновского массива [10].

Таблица 1. Содержания главных (мас.%), редких (г/т) элементов и их индикаторные отношения в метабазах Исаковского террейна

Компонент	№ образца						
	1	2	3	4	11	12	14
SiO ₂	48,05	42,94	44,03	41,81	48,11	48,71	45,37
TiO ₂	0,91	0,92	1,35	1,37	1,19	1,30	1,06
Al ₂ O ₃	18,27	16,14	15,41	15,76	16,13	14,29	15,68
Fe ₂ O ₃	8,60	11,72	11,99	18,08	12,29	11,71	11,21
MnO	0,11	0,17	0,19	0,50	0,19	0,21	0,17
MgO	7,54	7,90	9,70	10,16	6,11	8,30	9,12
CaO	12,34	9,58	11,19	6,97	11,76	10,62	13,07
Na ₂ O	2,55	2,84	1,68	1,11	2,29	2,60	1,47
K ₂ O	0,31	0,28	0,08	0,05	0,13	0,08	0,05
P ₂ O ₅	0,08	0,09	0,14	0,14	0,08	0,15	0,11
BaO	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
SO ₃	0,04	0,12	0,13	0,16	<0,03	<0,03	<0,03
V ₂ O ₅	0,03	0,029	0,047	0,047	0,05	0,05	0,05
Cr ₂ O ₃	0,04	0,046	0,032	0,029	0,05	0,02	0,03
NiO	0,01	0,029	0,005	<0,003	0,01	0,01	0,01
LOI	1,41	7,49	3,89	3,84	1,23	1,48	2,64
SUM	100,33	100,30	99,85	100,03	99,64	99,56	100,09
Rb	0,9	4,5	0,62	0,75	2,8	1,66	0,55
Sr	79	133	133	49	92	115	98
Y	36	23	28	29	34	29	33
Zr	74	62	85	87	84	80	82
Nb	2,2	7,6	6,1	5,5	4,3	3,2	3,4
Cs		0,41	<0,1	<0,1			
Ba	12	5,8	8,4	6,1	19	22	9,4
La	1,6	6,2	5,3	5,6	1,1	2,2	2,3

Компонент	№ образца						
	1	2	3	4	11	12	14
Ce	6,8	13,0	12,2	12,8	8,4	10,3	7,1
Pr	1,2	1,96	1,98	2,1	1,57	1,48	1,28
Nd	6,7	8,9	9,5	9,8	8,1	8,6	7,8
Sm	2,7	2,7	3,2	3,1	2,5	3,1	2,7
Eu	1,02	1,05	1,35	1,18	1,04	1,05	1,08
Gd	3,51	3,3	4,1	3,9	3,31	3,79	3,63
Tb	0,66	0,62	0,78	0,75	0,69	0,64	0,68
Dy	4,57	4,1	5,1	5,2	5,02	4,41	4,78
Ho	1,04	0,87	1,07	1,15	1,11	0,99	1,02
Er	3,14	2,7	3,3	3,5	2,98	2,87	3,09
Tm	0,46	0,41	0,51	0,56	0,48	0,39	0,45
Yb	3,02	2,6	3,2	3,6	2,89	2,94	3,07
Lu	0,48	0,39	0,48	0,53	0,42	0,43	0,39
Hf	2,08	1,78	2,4	2,5	1,96	2,11	1,7
Ta	0,19	0,54	0,39	0,52	0,18	0,26	0,27
Th	0,14	0,72	0,51	0,69	0,16	0,28	0,38
U	0,06	0,21	0,15	0,18	0,08	0,07	0,05
<i>f</i>	0,51	0,57	0,53	0,62	0,64	0,56	0,53
La/Yb(<i>n</i>)	0,36	1,60	1,13	1,06	0,26	0,50	0,51
La/Sm(<i>n</i>)	0,37	1,45	1,06	1,15	0,28	0,45	0,54
Gd/Yb(<i>n</i>)	0,94	1,01	1,03	0,88	0,92	1,04	0,95
Eu/Eu*	1,01	1,07	1,14	1,03	1,10	0,93	1,05
Ce/Ce*	1,12	0,89	0,90	0,89	1,27	1,33	0,98
LREE/HREE	1,32	2,56	2,04	2,07	1,50	1,84	1,47
Sum REE	36,90	48,85	52,07	53,75	39,61	43,19	39,37

Примечание. $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n + Gd_n) \times 0,5$; f (мол. количества) = $(FeO + 0,9 \times Fe_2O_3) / (FeO + 0,9 \times Fe_2O_3 + MgO)$; Sum и Sum REE — сумма главных и редкоземельных элементов соответственно. Содержания главных элементов получены на рентгеноспектральном анализаторе VRA-20R фирмы “Carl Zeiss Jena”. Концентрации редких элементов установлены на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finigan Mat) с ультразвуковым распылителем U-5000AT+.

Наиболее существенны различия этих пород по редкоземельному составу. Более распространённые низкотитанистые породы отличаются пониженными содержаниями REE ($\text{Sum REE} = 37\text{--}39 \text{ ppm}$) и наклонным концентрационным профилем распределения с $(\text{La/Yb})_n < 0,5$ (табл. 1; рис. 1а), характерным для нормальных базальтов срединно-океанических хребтов N-типа (N-MORB). Спектры REE высокотитанистых метабазитов обогащены LREE ($\text{Sum REE} = 43\text{--}54 \text{ ppm}$) и имеют плоский профиль распределения $(\text{La/Yb})_n > 1$, что типично для обогащённых базальтов океанического дна E-типа (E-MORB) (рис. 1а). Общее для большинства мультиэлементных спектров — деплетирование в отношении LILE (Rb, Ba) и отчётливо выраженные K- и Sr-минимумы (рис. 1б). Влияние субдукционной компоненты для этих пород выражается в более высоких по сравнению с N-MORB содержаниях Ba, Th, Ta, Nb, Zr, Hf.

В целом изученные метабазиты имеют слабо фракционированные мультиэлементные спектры, занимающие промежуточное положение между спектрами N- и E-MORB-базальтов (рис. 1а).

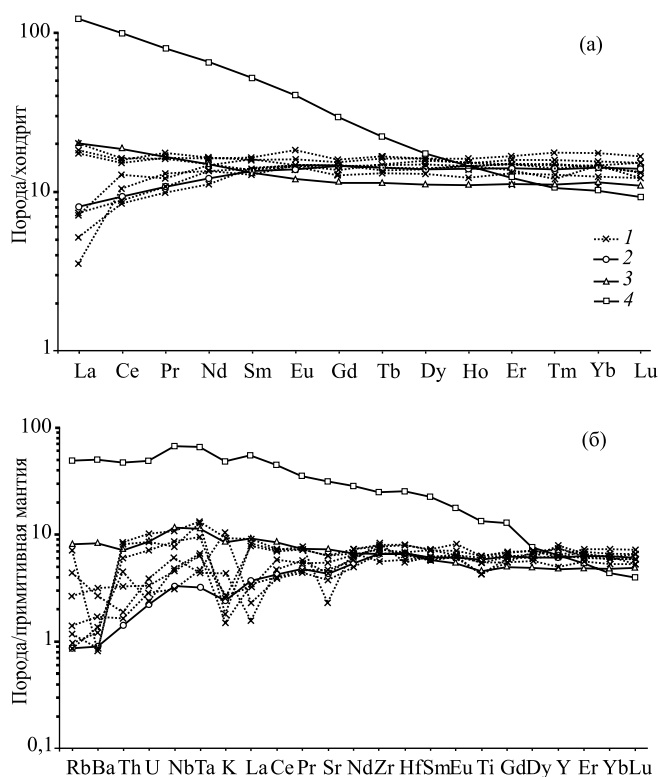


Рис. 1. Спектры распределения REE, нормированные к хондриту (а), и спайдердиаграммы содержаний микроэлементов, нормированных к составу примитивной мантии (б), для метабазитов Исаковского террейна (1) в сравнении с основными разновидностями базальтов: N-MORB (2), E-MORB (3), OIB (4).

По ряду петро- и геохимических параметров эти породы сопоставимы с метабазитами Панимбинско-Рыбинского вулканического пояса в Приангарье (рис. 2). Принадлежность этих пород к группе нормальных и обогащённых базальтоидов подтверждается диагностическими диаграммами, основанными на соотношениях концентраций Hf–Th–Ta (рис. 2а), Zr–Nb–Y (рис. 2б), $\text{P}_2\text{O}_5\text{--TiO}_2$ (рис. 3а) и Nb/Y–Zr/Y (рис. 3б). Обзор этих диаграмм в [11]. Это отличает их от более древних габброидов дайкового пояса [12] и ортоамфиболитов западной окраины Енисейского кряжа [13], относящихся к внутриплитным базальтоидам и островодужным толеитам. В отличие от пород Исаковского террейна, эти породы обогащены LREE и имеют более дифференцированные спектры распределения элементов с высокими отношениями: $(\text{La/Yb})_n$ до 6, $(\text{La/Sm})_n$ до 2,5, $(\text{Gd/Yb})_n > 2$, что указывает на образование их протолитов из обогащённого мантийного источника или контаминацию коровым материалом. Для них характерны повышенные концентрации крупноионных литофильных (Rb, Ba, K), радиоактивных (Th, U), высоkozарядных (Nb, Ta, Zr, Hf) элементов. На диаграмме Nb/Y–Zr/Y точки составов таких метабазитов находятся преимущественно в области внутриплитных базальтов между E-MORB и OIB, а по ряду петрогеохимических особенностей они сопоставимы с толеитовыми базальтами океанических островных дуг [12, 13].

Контрастные типы редкоземельных и мультиэлементных спектров для метабазитов разного петрохимического состава свидетельствуют в пользу унаследования распределения и уровня концентраций редких элементов от магматических протолитов — родоначальных магм [14]. Характер редкоземельных спектров, различные величины $(\text{La/Sm})_n$, $(\text{La/Yb})_n$ и содержаний Hf, Zr, Nb, Ta отражают разную деплетированность состава мантийных источников или степень плавления. Протолиты низкотитанистых метабазитов Исаковского террейна с пониженными Nb/Y, Zr/Y могли образоваться при частичном плавлении деплетированного мантийного источника, обеднённого несовместимыми элементами-примесями и сопоставимого по своим геохимическим характеристикам с верхней мантией, продуцирующей базальты N-MORB. Повышенные Nb/Y, Zr/Y для более титанистых пород указывают на обогащённый характер их мантийных компонентов, ответственных за формирование преимущественно E-MORB-базальтов.

U–Pb-датирование цирконов из пробы 14 метабазитов выполнено на ионном микрозонде

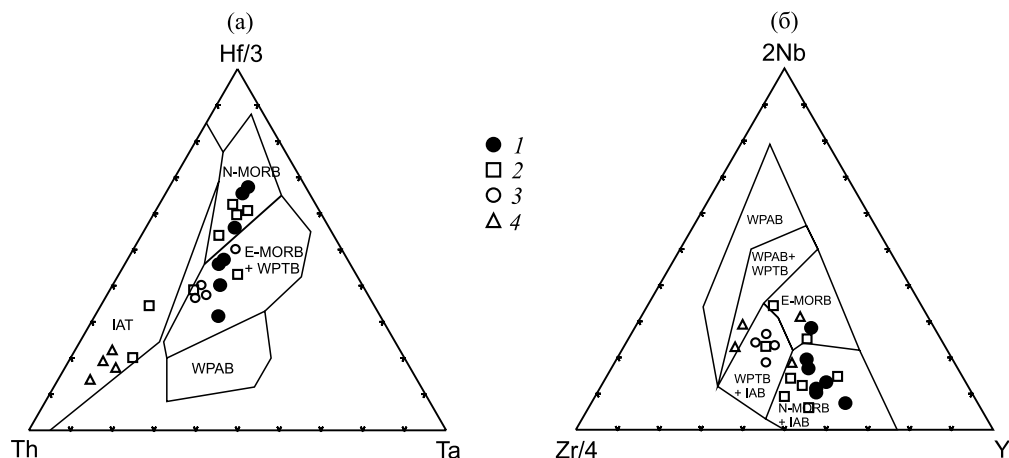


Рис. 2. Положение фигуративных точек составов метабазитов Исаковского террейна (1) по сравнению с более древними (2) метабазитами Рыбинско-Панинбинского вулканического пояса (1100 млн лет) [11], (3) амфиболитами дайкового пояса ПРСЗ (800 млн лет) [12], (4) ортоамфиболитами гаревского комплекса (900 млн лет) [13] на диаграммах Hf–Th–Ta (a) и Zr–Nb–Y (б). Поля составов на диаграммах: N- и E-тип MORB — “нормальные” и “обогащённые” базальты срединно-океанических хребтов, WPAB — внутриплитные щелочные базальты, WPTB — внутриплитные толеитовые базальты, IAB — островодужные базальты, IAT — островодужные толеиты.

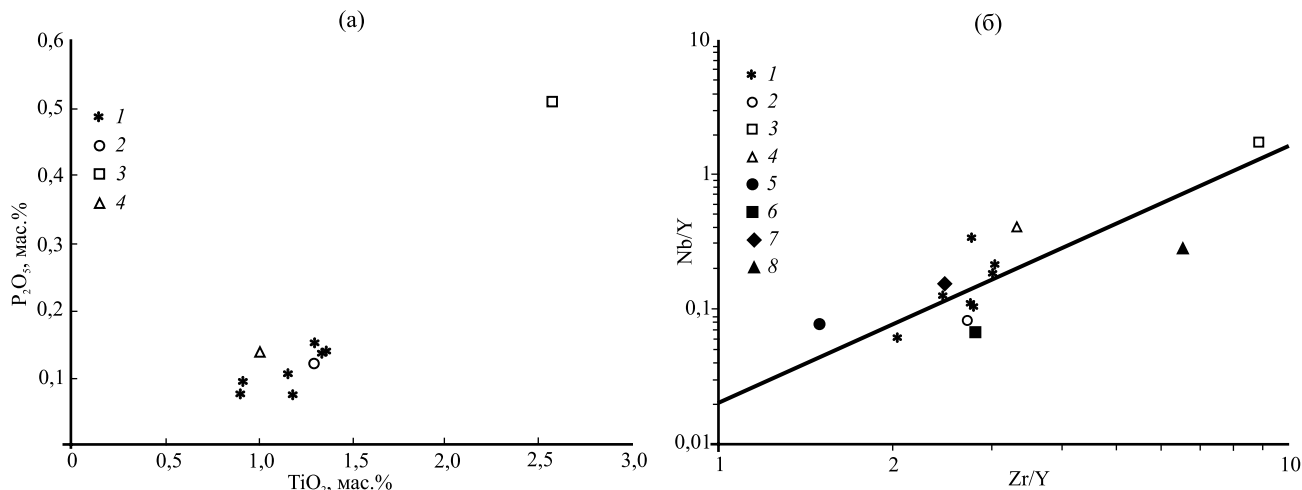


Рис. 3. Диаграммы TiO_2 – P_2O_5 (a) и Zr/Y – Nb/Y (б) для метабазитов Исаковского террейна (1) и основных разновидностей базальтов: N-MORB (2), OIB (3), E-MORB (3), (4). Мантийные компоненты: DEP — глубинная деплетированная мантия (5), DM — деплетированная мантия (6), PM — примитивная мантия (7), EN — обогащённая мантия (8).

SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ, С.-Петербург). В катодоллюминесцентном изображении цирконы характеризуется длинно-, короткопризматическим габитусом с тонкой секториальной зональностью и расплавленными включениями в ядрах зёрен, что свидетельствует в пользу их магматического происхождения. В основном зёрна цирконов имеют нормальные $\text{Th/U} = 0,21$ – $1,02$, что с учётом особенностей морфологии и внутреннего строения также свидетельствует о магматической природе циркона. Фигуративные точки 10 центральных и краевых частей зёрен цирконов расположены вдоль конкордии 671–719 млн лет, со средним значением возраста $701,6 \pm 8,4$ млн лет, рассчитанным с погрешностью 2σ (рис. 4). Близкий возраст ядер и внешних кайм

циркона, возможно, свидетельствует о перекристаллизации ядер с потерей радиогенного Pb в результате последующего метаморфизма. Результаты U–Pb датирования метабазитов почти синхронны с U–Pb-возрастами цирконов островодужных плагиогранитов Порожнинского массива ($697,2 \pm 3,6$ млн лет) [15]. В то же время они несколько древнее U–Pb-данных по цирконам из амфиболитов Борисихинского офиолитового массива (682 ± 13 млн лет), характеризующихся более высокими значениями Nb/Y [1], и из дацитов вулканоплутонического блока ($691,8 \pm 8,8$ млн лет) (устное сообщение И.И. Лиханова), располагающихся в составе Исаковского террейна. Это позволяет рассматривать самые древние возрастные оценки, установленные

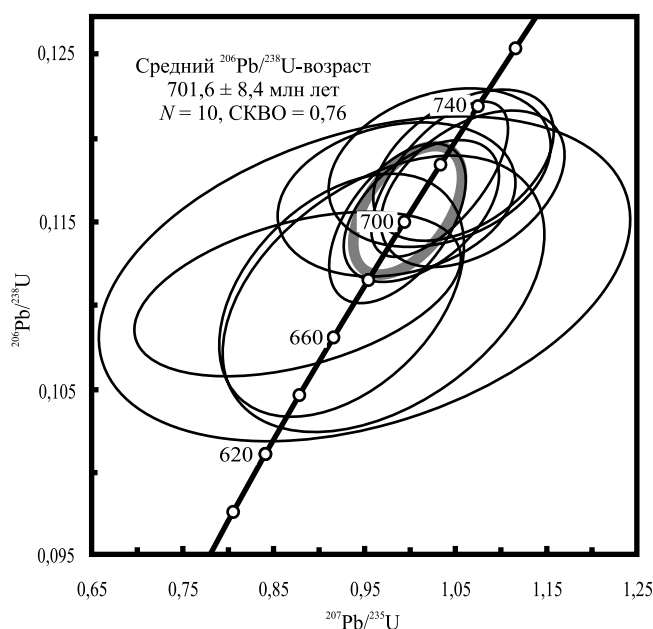


Рис. 4. Диаграмма с конкордией для цирконов из высокобарического метабазита (обр. 14).

нами среди офиолитов Исаковского пояса, в качестве обоснования времени начала формирования океанической коры в регионе. Эти события имеют важное геодинамическое значение. Они фиксируют один из ранних этапов развития Палеоазиатского океана начиная с момента его заложения, завершившегося в конце неопротерозоя байкальским орогенезом вдоль современной западной и южной окраин древнего Сибирского континента (Енисейский край, Байкало-Патомском нагорье и Забайкалье).

В последовательности тектонических событий Енисейского края изученные проявления магматизма и продукты их метаморфизма могли отражать различные этапы эволюции океанической коры. Совокупность вышеуказанных датировок цирконов по Исаковскому террейну в Заангарье Енисейского края совместно с датировками вулканитов Предивинского террейна, расположенного на юге Енисейского края ($637 \pm 5,7$ млн лет) [15], указывают на формирование офиолитов и островных дуг Приенисейской зоны в интервале 700–640 млн лет. В конце неопротерозоя в диапазоне 640–600 млн лет океаническая литосфера, фрагментом которой являлись базиты Исаковского террейна, субдуцировала под активную окраину Сибирского континента. Формирование высокобарических тектонитов

в шовной зоне маркирует заключительный этап неопротерозойской истории Енисейского края, связанный с завершением аккреции Исаковского блока к западной окраине Сибирского крона. Это согласуется со временем формирования высокобарических продуктов процессов субдукции в Центрально-Азиатском подвижном поясе [4].

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0330–2016–004, и при поддержке РФФИ (18–05–00152).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмичёв А.Б., Падерин И.П., Антонов А.В. // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 12. С. 1175–1188.
2. Лиханов И.И., Козлов П.С., Савко К.А., Крылов А.А., Зиновьев С.В. // ДАН. 2019. Т. 484. № 2. С. 85–91.
3. Ножкин А.Д., Дмитриева Н.В., Лиханов И.И., Серов П.А., Козлов П.С. // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 11. С. 1992–2014.
4. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П., Рыцк Е.Ю., Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. // ДАН. 2006. Т. 410. № 5. С. 657–663.
5. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Зиновьев С.В. // ДАН. 2013. Т. 450. № 6. С. 685–690.
6. Козлов П.С., Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Зиновьев С.В. // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 11. С. 1476–1496.
7. Лиханов И.И., Ревердатто В.В. // Геохимия. 2011. Т. 49. № 3. С. 239–267.
8. Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С. // Геотектоника. 2014. Т. 48. № 5. С. 32–53.
9. Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V., Sukhorukov V.P. // J. Asian Earth Sci. 2015. V. 113. P. 391–410.
10. Ножкин А.Д., Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Баянова Т.Б., Зиновьев С.В., Козлов П.С., Попов Н.В., Дмитриева Н.В. // ДАН. 2018. Т. 474. № 5. С. 589–604.
11. Лиханов И.И., Ревердатто В.В. // Геохимия. 2016. Т. 54. № 2. С. 143–164.
12. Лиханов И.И., Ревердатто В.В. // Геохимия. 2015. Т. 53. № 8. С. 675–694.
13. Лиханов И.И., Ревердатто В.В. // Геохимия. 2014. Т. 52. № 1. С. 3–25.
14. Likhanov I.I., Reverdatto V.V. // Acta Geol. Sinica-English Edition. 2007. V. 81. № 3. P. 409–423.
15. Верниковский В.А., Верниковская А.В. // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 35–52.

FIRST DATA ON THE NATURE AND AGE OF THE PROTOLITH OF HIGH-PRESSURE TECTONITES OF YENISEI RIDGE: A LINK TO THE EARLY STAGE OF FORMATION OF THE PALEOASIAN OCEAN

I. I. Likhanov, K. A. Savko

Presented by Academician of the RAS N.P. Pokhilenko November 8, 2016

Received October 3, 2016

The petrogeochemical characteristics of high-pressure mafic tectonites from the Yenisei suture zone of Yenisei Ridge indicate that N-MORB and E-MORB with an age of 701.6 ± 8.4 Ma were their protolith. The formation of N-MORB with the more primitive chemical composition occurred at the initial stages of spreading, when the upper horizons of the depleted mantle were molten. The high-Ti basalt was formed as the product of melting of the enriched mantle substrate at the later stages of spreading. These events are related to the early stage in the evolution of the Paleo-Asian Ocean on the western margin of the Siberian Craton.

Keywords: geochemistry, protolith, zircon U–Pb SHRIMP II dating, Yenisei Ridge, Paleo-Asian Ocean.

УДК 550.348

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ СКВАЖИННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ДАННЫМИ ПО МЕХАНИЗМАМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В. А. Гаврилов^{1,*}, А. В. Ландер², Ю. В. Морозова¹

Представлено академиком РАН Е. И. Гордеевым 16.07.2018 г.

Поступило 03.08.2018 г.

Приводятся результаты сопоставления данных двух методов скважинного геофизического мониторинга напряжённо-деформированного состояния геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона с данными по механизмам очагов землетрясений, произошедших в этой зоне на том же временном интервале.

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, электромагнитное излучение, механизмы очагов землетрясений, скважина, Петропавловск-Камчатский геодинамический полигон, напряжённо-деформированное состояние геосреды.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846745-749>

Проводимые с начала 2000-х годов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (зона радиусом примерно 100 км с центром в г. Петропавловске-Камчатском) скважинные геоакустические измерения и электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами позволяют сделать вывод о высокой эффективности двух новых методов мониторинга напряжённо-деформированного состояния (НДС) геосреды, основой которых являются данные указанных видов измерений.

Первый из методов базируется на открытом в ходе многолетних исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне эффекте модуляции интенсивности геоакустической эмиссии (ГАЭ) слабым переменным электрическим полем [1–3]. Физическая суть эффекта заключается в зависимости интенсивности геоакустических процессов от амплитуды напряжённости переменного электрического поля, воздействующего на геосреду в зоне измерительной скважины, и степени влажности геосреды [4]. Например, воздействие на геосреду внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) с суточными вариациями амплитуды напряжённости поля будет вызывать соответствующие

суточные вариации амплитуды ГАЭ — отклики ГАЭ на воздействие ЭМИ. При постоянных амплитудах суточных вариаций ЭМИ амплитуды откликов ГАЭ на воздействие ЭМИ будут определяться степенью влажности геосреды.

Данные многолетних измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне показывают, что для заключительных стадий подготовки подавляющего числа местных сильных землетрясений, а также для ряда сильных землетрясений с эпицентрными расстояниями более 1000 км характерны быстрые и значительные изменения амплитуд откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ. Согласно результатам исследований физические причины указанного эффекта связаны с процессами перераспределения порового давления в порово-трещинном пространстве прискважинной зоны вследствие изменений НДС геосреды на заключительных стадиях подготовки землетрясений [5, 6]. Отметим, что указанный эффект стабильно наблюдается для землетрясений, для которых величина $S = L/R_h \cdot 100\%$ ($L = 10^{0,44M-1,29}$ — длина очага землетрясения в км при аппроксимировании формы очага эллипсом; R_h — гипоцентрное расстояние в км, M — магнитуа землетрясения) составляет $\geq 5\%$.

Второй из указанных в начале статьи методов непрерывного мониторинга изменений НДС геосреды базируется на данных электромагнитных измерений с использованием подземных электрических антенн, что позволяет контролировать изменения удельного сопротивления $\Delta\rho$ геосреды в зоне скважины [7]. Метод характерен своей высокой

¹ Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский

² Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: vgavr1403@mail.ru

тензочувствительностью и стабильностью результатов: перед всеми сильными землетрясениями с $S \geq 20\%$, произошедшими с 2006 г., изменения величины $\Delta\rho$, контролируемой данным методом, достигали 350–700%. К примеру, накануне сильнейшего Жупановского землетрясения ($M = 7,2$; $S = 39\%$), произошедшего 30 января 2016 г. на эпицентральной дистанции $R_e = 107$ км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км, величина $\Delta\rho$ за двое суток до землетрясения изменилась примерно на 700% [8].

Полученные к настоящему времени результаты ставят ряд вопросов, ответы на которые необходимы для дальнейшего развития исследований. В том числе необходимо понимание того, насколько результаты мониторинга НДС геосреды, базирующиеся на данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, согласуются с данными других видов измерений, отражающих изменения параметров поля сейсмотектонических напряжений в той же зоне. В этой связи авторами было проведено сопоставление результатов мониторинга НДС, базирующихся на данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, с данными по механизмам очагов землетрясений, произошедших на том же временном интервале в районе Авачинского залива (восточная Камчатка) — одной из наиболее сейсмически активных областей Курило-Камчатской дуги.

Для проведения исследований использовались данные геоакустических и электромагнитных измерений, полученные при измерениях на базе скважины Г-1 на интервале ноябрь 2009 г. — июль 2017 г. Скважина Г-1 расположена на окраине г. Петропавловска-Камчатского на удалении около 15 км от береговой черты Авачинского залива. Скважина имеет глубину 2542 м, обсажена на всю глубину. В исследованиях использовались данные геоакустических измерений, проводимые на глубине 1012 м с применением трёхкомпонентного геофона с пьезоэлектрическими датчиками типа А1612. Данные электромагнитных измерений были получены с использованием подземной электрической антенны, основным конструктивным элементом которой является обсадная колонна скважины [7].

Касаясь использованных в исследованиях данных по механизмам очагов землетрясений, отметим, что согласно полученным к настоящему времени результатам ключевую роль для восточной Камчатки играют сжимающие напряжения, ориентированные преимущественно в северо-западном направлении вкрест простирания основных морфоструктур [9, 10].

Это относится ко всей пологой верхней части Камчатской зоны субдукции, что приблизительно соответствует области K на рис. 1, простирающейся от $50,0^\circ$ до $56,6^\circ$ с.ш., в том числе к району Авачинского залива (область A , являющаяся частью области K , рис. 1). Основное поле сейсмотектонических напряжений области K отражается в устойчивом повторении здесь взбросовых механизмов с юго-западным простиранием плоскостей разрыва. Для среднего тензора сейсмического момента, построенного по 309 сильнейшим землетрясениям, произошедшим в области K за период 1976–2017 гг. (выборка из каталога GCMT всех событий области, относящихся к зоне субдукции, с глубинами до 70 км), азимут простирания плоскости разрыва равен 210° , а ось сжатия субгоризонтальна (угол наклона равен 16°) и направлена по азимуту 125° . Основную часть этих событий составляют землетрясения с магнитудой $M_w > 5,0$. В область A (рис. 1) вошла подвыборка из 176 землетрясений, эпицентры которых наиболее близко расположены к району г. Петропавловска-Камчатского. Аналогичные параметры среднего механизма этих землетрясений

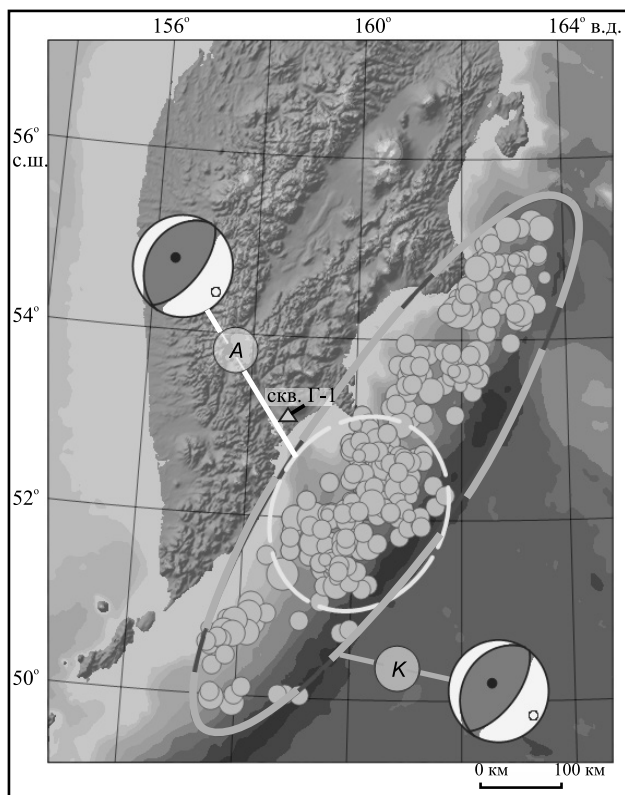


Рис. 1. Приблизительные границы областей K и A и эпицентры центроидов использованных субдукционных землетрясений с $M_w > 5,0$, произошедших в этих областях за период 1976–2017 гг. (кружки внутри областей). Представлены также диаграммы средних тензоров для каждой из областей.

практически совпадают с соответствующими значениями для более протяжённой области K : азимут простирания плоскости разрыва 212° , угол наклона и азимут оси сжатия соответственно 17° и 127° .

Выше была отмечена высокая устойчивость повторений типа механизма очагов землетрясений верхней части Камчатской зоны субдукции. Однако в отдельных случаях здесь имеют место события, существенно отличающиеся по типу очаговых деформаций от остальных событий. Можно предположить, что такие землетрясения с нетипичными механизмами очагов происходят в интервалы времени, когда в общем региональном или локальных полях сейсмотектонических напряжений возникают определённые изменения. Для сравнения с результатами геоакустических и электромагнитных измерений, полученными при измерениях на базе скважины Г-1, были выбраны землетрясения области A из-за близости этой зоны к месту расположения скважины Г-1. Сравнения проводили на временном интервале 2008–2017 гг., надёжно представленном данными скважинных измерений. Подкаталог тензоров сейсмического момента области A за это время представлен 59 событиями.

Для перехода от дискретных механизмов очагов землетрясений к непрерывным временным рядам напряжений, сброшенным в ходе сейсмического процесса, соответствующие тензоры (пятимерные линейные объекты) сглаживались скользящими временными (косинусоидальными) окнами. Эффективная ширина окна сглаживания составляла около 10 месяцев. Таким образом, для каждого момента вычислялся “локально-средний” по времени (и выбранной пространственной области) механизм. По соответствующему тензору независимо для каждого момента времени вычислялись параметры его главных осей (рис. 2в, г). Подчеркнём, что кривые азимута главной оси сжатия (рис. 2в) и наклона к горизонту главной оси сжатия (рис. 2г) являются результатом осреднения соответствующих тензоров, но не результатом сглаживания соответствующих азимутов и наклонов.

Сравнивая данные скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, представленные на рис. 2, с изменениями параметров механизмов очагов землетрясений, можно отметить следующее.

1. Как показано в [3, 5], резкое и значительное уменьшение амплитуд откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ с одновременным уменьшением удельного электрического сопротивления геосреды в зоне скважины Г-1 на интервале март 2011 г. — август 2012 г. (рис. 2а, б) могут являться следствием

аномально высокого роста сжимающих напряжений на постсейсмической стадии Тохокского мегаземлетрясения ($M_w = 9,0$), произошедшего 11.03.2011 г. на эпицентральной дистанции около 2000 км от г. Петропавловска-Камчатского. Из данных, приведённых на рис. 2, следует, что для осреднённых механизмов очагов землетрясений, произошедших на том же временном интервале в районе Авачинского залива, наблюдались значительные изменения азимута направления (рис. 2в) и угла наклона главной оси сжатия (рис. 2г).

2. Из данных, приведённых на рис. 2а, можно видеть, что сразу после момента сильнейшего ($M_w = 7,7$) глубокого ($H = 626$ км) землетрясения, произошедшего 14.08.2012 г. на эпицентральной дистанции около 1000 км от скважины Г-1 (см. врезку к рис. 2а), началось восстановление откликов ГАЭ в зоне скважины Г-1 для глубин порядка 1000 м. Как показано в [8], физические причины такого результата могут объясняться началом роста влажности пород в зоне скважины Г-1 вследствие увеличения объёма порово-трещинного пространства геосреды в связи с переходом НДС геосреды от стадии сжатия к стадии относительного растяжения. В этой связи интервал сентябрь 2012 г. — апрель 2015 г. по данным скважинных измерений интерпретируется как интервал относительного растяжения. Данные о механизмах очагов землетрясений (рис. 2в, г) указывают на то, что к моменту начала стадии растяжения (определённому по данным скважинных измерений) значения азимута направления (рис. 2в) и угла наклона главной оси сжатия (рис. 2г) вернулись к своим среднемноголетним значениям.

3. Аномальные изменения параметров ГАЭ (рис. 2а) и удельного электрического сопротивления геосреды (рис. 2б) в зоне скважины Г-1 на интервале май 2015 г. — июнь 2017 г. совпадают с заключительной стадией подготовки и реализацией сильнейшего (магнитуда $M_w = 7,2$) Жупановского землетрясения, произошедшего 30.01.2016 г. на эпицентральной дистанции $R_e = 107$ км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км [12]. Как следует из данных, приведённых на рис. 2в, г, для этого временного интервала также наблюдаются синхронные отклонения от среднемноголетних значений параметров механизмов землетрясений: азимута (рис. 2в) и угла наклона (рис. 2г) главной оси сжатия сброшенных напряжений.

Таким образом, сопоставление результатов мониторинга НДС геосреды на основе данных геоакустических и электромагнитных измерений, проводимых на базе скважины Г-1, с данными по меха-

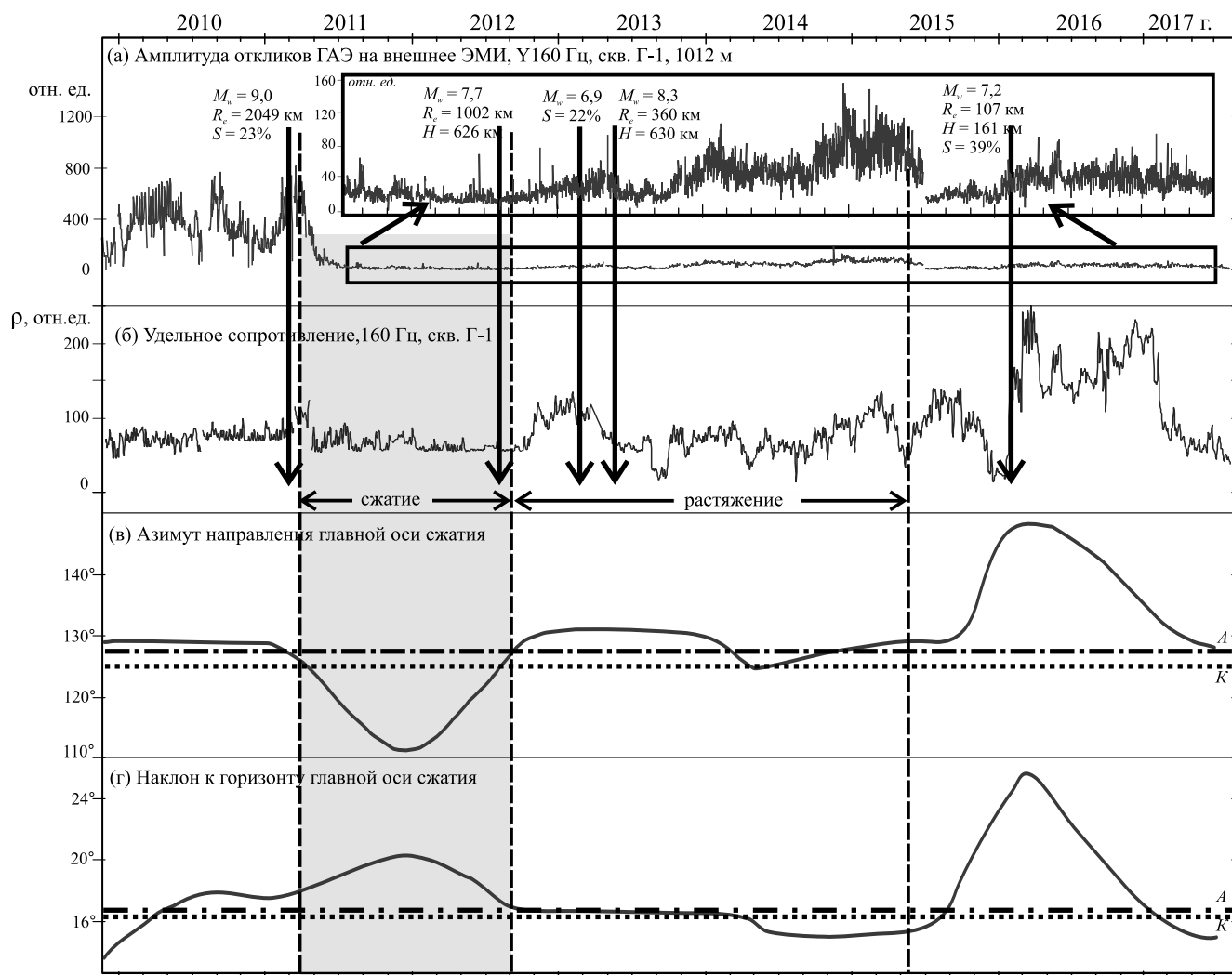


Рис. 2. Изменения параметров ГАЭ и удельного сопротивления геосреды в зоне скважины Г-1 в сравнении с изменениями параметров механизмов очагов землетрясений: а — среднеквадратические значения откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ для глубины 1012 м (Y-компонента, канал 160 Гц), на врезке — изменения амплитуды откликов ГАЭ в более детальном масштабе; б — изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 на глубинах до 1000 м; в — азимут направления главной оси сжатия по данным о механизмах очагов землетрясений, штрихпунктирная и пунктирная горизонтальные линии А и К — значения азимута для среднего тензора для областей А и К соответственно; г — наклон к горизонту главной оси сжатия по данным о механизмах очагов землетрясений, штрихпунктирная и пунктирная горизонтальные линии А и К — значения наклона для среднего тензора для областей А и К соответственно. Стадии сжатия и растяжения определены по данным скважинных измерений.

низмам очагов землетрясений, произошедших в районе Авачинского залива, показывает их качественное согласование. Такой результат можно считать дополнительным подтверждением обоснованности использования скважинных геоакустических измерений и измерений с подземными электрическими антеннами для мониторинга НДС геосреды сейсмоактивных регионов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Президиума ДВО РАН (грант № 18–5–095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчевус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67.
2. Gavrilov V., Bogomolov L., Morozova Yu., Storcheus A. Variations in Geoacoustic Emissions in a Deep Borehole and Its Correlation with Seismicity // Ann. Geophys. 2008. V. 51. № 5/6. P. 737–753.

3. *Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V.* Modulating Impact of Electromagnetic Radiation on Geoacoustic Emission of Rocks // *Rus. J. Earth Sci.* 2013. V. 13. ES1002. DOI: 10.2205/2013ES000527.
4. *Gavrilov V.A., Naumov A.V.* Modulation of Geoacoustic Emission Intensity by Time-Varying Electric Field // *Rus. J. Earth Sci.* 2017. V. 17. № 1. DOI: 10.2205/2017ES000591.
5. *Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В.* Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // *Физика Земли.* 2014. № 1. С. 89–103.
6. *Гаврилов В.А., Пантелеев И.А.* Влияние фильтрационных процессов в горных породах на характеристики геоакустической эмиссии // *Геофиз. исслед.* 2016. Т. 17. № 2. С. 32–53.
7. *Гаврилов В.А.* О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // *Сейсм. приборы.* 2013. Т. 49. № 3. С. 25–38.
8. *Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В.* Сквационные геоакустические измерения в системе комплексного геофизического мониторинга и прогноза землетрясений на Камчатке // *Уч. зап. физ. фак-та МГУ.* 2017. № 5. С. 1750802-1–1750802-4.
9. *Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // *Тихоокеан. геология.* 2009. Т. 28. № 5. С. 70–84.
10. Каталог GCMT: The Global Centroid-Moment-Tensor Project. www.globalcmt.org/CMTsearch.html
11. Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН. <http://www.emsd.ru/sdis/info/earthquakes/catalogue.php>

COMPARISON OF BOREHOLE GEOACOUSTIC AND ELECTROMAGNETIC DATA WITH DATA OF EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS

V. A. Gavrilov, A. V. Lander, Yu. V. Morozova

Presented by Academician of the RAS E.I. Gordeyev July 16, 2018

Received August 3, 2018

The results of comparing the data of two methods of geophysical monitoring of the stress-strain state of a borehole of the geoenvironment in the zone of Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing site to the data on the focal mechanisms of earthquakes that occurred in this zone on the same time interval are presented.

Keywords: geoacoustic emission, electromagnetic radiation, earthquake focal mechanisms, borehole, Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing site, stress-strain state of the geoenvironment.

УДК 504.45.064.36:574

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Б. Л. Сухоруков^{1,2,*}, член-корреспондент РАН А. М. Никаноров^{1,2}

Поступило 25.09.2018 г.

Представлен новый способ анализа спектрометрической информации, получаемой современными спектрометрами видимого диапазона длин волн при съёмках поверхностных водных объектов. Эффективность нового способа интерпретации спектрометрической информации видимого диапазона продемонстрирована с использованием ранее предложенного нами пространства оптических образов (ПОО), образованного из экспериментальных спектров КСЯ (коэффициент спектральной яркости), совместно с модельными. Наличие спектров КСЯ, рассчитанных с показателями поглощения, измеренными в определённые гидрологические сезоны с известным структурным составом фитопланктона, позволяют выполнить градуировку ПОО по фитопланктону различного структурного состава. Построенная траектория изменения состояния р. Дон по данным дистанционной спектрометрии показывает изменение в составе фитопланктона в течение периода наблюдения.

Ключевые слова: дистанционная спектрометрия, фитопланктон, коэффициент спектральной яркости, пространство оптических образов.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846750-754>

На настоящем этапе развития методов интерпретации дистанционной спектрометрической информации видимого диапазона измеряемые величины яркости восходящего от воды излучения используют исключительно для определения концентраций ограниченного перечня оптически активных (видимых) компонентов (ОАК) водных объектов (ВО) путём построения биооптических моделей с последующим решением обратной задачи.

Биооптические модели строят на основе сопоставления концентрации ОАК — хлорофилл *a* фитопланктона, растворённых органических и минеральных взвешенных веществ — с комбинацией измеренных величин коэффициента спектральной яркости (КСЯ). Для поверхностных водных объектов (вод типа II: мутные, высокопродуктивные [1]) используют красную область спектра и для различных моделей две или три длины волны: 675, 705 нм или 670, 710, 740 нм [2]. Выбор этих длин волн, безусловно, верен, но при этом из рассмотрения исключают спектральный диапазон в области 620–650 нм, чувствительный к изменению пигментного состава фитопланктона, а именно к перераспределению вспомогательных пигментов, хлорофиллов *b*, *c*, и к появлению в воде фикобилинов, характерных для синезелёных водорослей [3, 4] (рис. 1). Кроме того, не учитывают изменения величины

КСЯ в диапазоне длин волн 520–580 нм, где форма спектров КСЯ (СКСЯ) также с большой долей вероятности меняется именно за счёт изменения структурного состава фитопланктона.

СКСЯ водных экосистем, полученные современной спектральной аппаратурой в видимой области с разрешением < 2 нм, несмотря на свою кажущуюся простоту и “похожесть”, заметно различаются в деталях. Наблюдаются сдвиги максимумов, появляются двойные максимумы, отличные от симметричных, и другие спектральные “особенности”. На рис. 1 приведены экспериментальные СКСЯ некоторых ВО с указанием длин волн основных особенностей СКСЯ, а также длин волн, используемых и не используемых при построении биооптических моделей.

Причину различий формы СКСЯ можно объяснить, анализируя выражения, полученные на базе работ по теории светорассеяния [5, 6].

Если не требуется точности вычисления КСЯ > 30% при фиксированных геометрических условиях съёмки и учёте аддитивности показателей поглощения, рассеяния, то для аналитического расчёта СКСЯ получены следующие уравнения [7, 8]:

$$\rho_{\lambda}(\sigma, \alpha) = \Sigma_{\lambda}(\sigma, \alpha) / K_{\lambda}(\sigma, \alpha), \quad (1)$$

$$\Sigma_{\lambda}(\sigma, \alpha) = \sigma_{\lambda, \text{МВ}}^{\gamma} \cdot C_{\text{МВ}} + \sigma_{\lambda, \text{ФП}}^{\gamma} \cdot C_{\text{ФП}} + \sigma_{\text{воды}}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} K_{\lambda}(\sigma, \alpha) = & [\alpha_{\lambda, \text{МВ}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{МВ}})] \cdot C_{\text{МВ}} + \\ & + [\alpha_{\lambda, \text{ФП}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{ФП}})] \cdot C_{\text{ФП}} + 0,5\sigma_{\lambda, \text{воды}} + \\ & + \alpha_{\lambda, \text{воды}} + \alpha_{\lambda, \text{РОВ}}. \end{aligned} \quad (3)$$

¹ Институт водных проблем

Российской Академии наук, Ростов-на-Дону

² Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону

*E-mail: bls-phys@yandex.ru

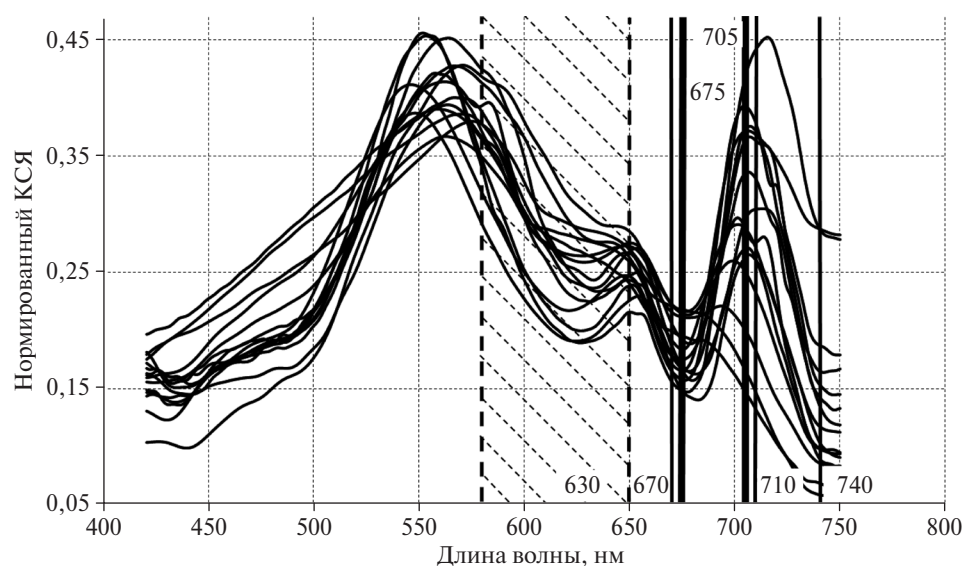


Рис. 1. Экспериментальные СКСЯ, полученные на различных водных объектах. Указаны длины волн двухволнового — 675, 705 нм и трёхволнового — 670, 710, 740 нм алгоритмов при построении биооптических моделей и область вблизи 630 нм, не используемая при построении биооптических моделей.

Здесь $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$, $\sigma_{\lambda, i}$, $\sigma_{\lambda, i}^{\gamma}$ — удельные по концентрации показатели поглощения, рассеяния и рассеяния на угол γ компонентов i (i принимает значения МВ, РОВ, ФП — минеральных взвешенных, растворённых органических веществ и фитопланктона соответственно) на длине волны λ , C_i — концентрации этих компонентов, $\Phi_{\lambda, i}$ — интеграл от индикатрисы рассеяния, который воспроизводит долю света, рассеянного в заднюю полусферу на длине волны λ , i -компонентой.

Видно, что в (3) концентрации оптически активных (видимых) компонентов входят в виде произведения с удельными показателями рассеяния или поглощения частиц и/или клеток экосистемы.

Известно (например, [9]), что спектры $\sigma_{\lambda, i}$ в видимой области не имеют селективных особенностей. Ярво выраженными селективными спектральными особенностями обладает только показатель поглощения, $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$, определяемый структурным составом фитопланктона и, следовательно, соотношением пигментов в его клетках. Наиболее заметно изменение $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$ проявляется при появлении в ВО и цветении синезелёных водорослей. В этом случае на спектральные особенности вспомогательных хлорофиллов b , c в клетках фитопланктона, характерных для зелёных и диатомовых водорослей, в области длин волн 600–650 нм накладываются особенности фикобилинов, в которых чаще всего доминирует фикоцианин.

Такое изменение в $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$ должно проявляться и проявляется (рис. 1) в изменении формы СКСЯ. При расчёте модельных СКСЯ это приводит к не-

обходимости уточнения (3) и замене $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$ на $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}^j$, где j указывает на определённый таксономический состав фитопланктона. В общем случае $j \rightarrow \infty$, но при проведении расчётов удобно выделять $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$ либо монокультур фитопланктона, либо с доминированием отдельных отделов. В этом случае j указывает на таксон известного состава.

Ранее было показано, что для наблюдения за внутриводными процессами по дистанционной спектрометрической информации удобно использовать такой “теоретический инструмент”, как пространство оптических образов (ПОО) [8–10]. Для получения ПОО со статистически устойчивыми свойствами его строят на базе всевозможных экспериментальных СКСЯ видимой области электромагнитного спектра, дополненных модельными, рассчитанными по (1)–(3). Общее количество спектров, использованных для построения ПОО, > 700 экспериментальных и несколько тысяч модельных.

Показано [9], что массив экспериментальных и модельных СКСЯ без значительной потери информации для вод типа II может быть преобразован в трёхмерный с обобщёнными координатами (ОК) — ОК1, ОК2, ОК3. Для поверхностных высокопродуктивных вод три обобщённые координаты описывают более 90% дисперсии СКСЯ, измеренных в течение указанного периода наблюдений. Соответственно, считая, что форма СКСЯ связана и/или определяется состоянием водной экосистемы, изменение формы СКСЯ в ПОО фактически отражает траекторию внутриводного процесса ВО [8, 9].

Добавление к экспериментальным СКСЯ модельных решает две принципиально важные задачи. Во-первых, достигается статистическая устойчивость ПОО. Во-вторых, модельные СКСЯ, рассчитанные на основе известных $\sigma_{\lambda,i}$, $\sigma_{\lambda,i}^y$, $\alpha_{\lambda,ФП^j}$ при известных C_i , позволяют строить изоплеты $C_{ФП}$, $C_{МВ}$ в ПОО и фактически осуществлять градуировку ПОО по известным ОАК. Появляется возможность оценивать направленность процесса изменения состояния экосистемы в реальном времени.

В нашей работе представлено развитие метода ПОО путём его градуировки не одной, а несколькими изоплетами с изменяющимся структурным составом фитопланктона j . Изоплеты $C_{ФП}$, $C_{МВ}$ строят по СКСЯ, рассчитанным с различными $\alpha_{\lambda,ФП^j}$, измеренными в различные гидрологические сезоны и, соответственно, при различном структурном составе фитопланктона. В нашей работе $\alpha_{\lambda,ФП^j}$ измеряли по методике, описанной в [10, 11]. На рис. 2 представлены спектры $\alpha_{\lambda,ФП^j}$, измеренные в пробах воды, отобранных в феврале (доминирование динофитовых и диатомовых, $\alpha_{\lambda,ФП^д}$) и в августе (доминирование синезелёных и эвгленовых $\alpha_{\lambda,ФП^{с-з}}$).

Рассчитанные на основе экспериментально измеренных $\alpha_{\lambda,ФП^j}$ СКСЯ позволили в трёхмерном ПОО одновременно построить изоплеты, $C_{ФП^д}$, $C_{МВ}$, и $C_{ФП^{с-з}}$, $C_{МВ}$ (рис. 3). На выносках рис. 3 показаны характерные экспериментальные СКСЯ, попадающие в различные области проградуированного ПОО.

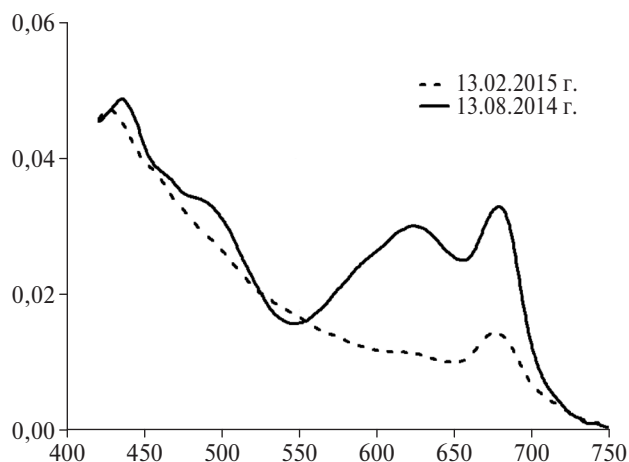


Рис. 2. Спектры удельного показателя поглощения фитопланктона, измеренные на р. Дон в феврале (доминирование динофитовых, диатомовых) и в августе (доминирование синезелёных, эвгленовых). Отмечена спектральная область максимума поглощения синезелёных микроводорослей.

Отметим, что изоплета $C_{ФП^3}$, $C_{МВ}$, рассчитанная для такого важного состояния развития фитопланктона, при котором доминируют зелёные микроводоросли, с $\alpha_{\lambda,ФП^3}$, находится между указанными и на рис. 3 не нанесена, чтобы не загромождать его).

Построенные при различном видовом составе фитопланктона j изоплеты рис. 2 выделяют в ПОО своеобразные, не перекрывающиеся между собой поверхности, “лепестки”, практически сходящиеся в точке с $ОК1 = 1,5$; $ОК2 = -1,5$, $ОК3 = 1,5$. В этой точке ПОО $C_{ФП} = 1$ мг/дм³, $C_{МВ} = 0$, и при таких концентрациях ОАК форма модельных СКСЯ для различного $\alpha_{\lambda,ФП^j}$ практически совпадает.

В ПОО, проградуированном вышеприведёнными изоплетами, построили траекторию изменения СКСЯ р. Дон в 2012 г. (рис. 3). Первую съёмку проводили 4 мая, последующие — с периодичностью около двух недель. Большинство СКСЯ (в ПОО — точки) попадают на лепесток изоплеты $C_{ФП^д}$, $C_{МВ}$, построенный по полученному в феврале $\alpha_{\lambda,ФП^д}$, что указывает на преобладание в экосистеме диатомовых и динофитовых микроводорослей с незначительной примесью синезелёных, зелёных в течение длительного промежутка времени. Однако СКСЯ, полученный 23 августа, переходит на поверхность лепестка, построенного по изоплете $C_{ФП^{с-з}}$, $C_{МВ}$, что говорит о резком изменении состояния экосистемы в этот промежуток времени. Форма СКСЯ на выноске (рис. 3) показывает, что в этот промежуток времени наблюдалось цветение синезелёных: появление минимума в СКСЯ на длине волны 630 нм, соответствующее увеличению максимума в $\alpha_{630,ФП^j}$. По данным аналитических определений структурный (таксономический) состав фитопланктона в 2012 г. отличался тем, что “сине-зелёное” цветение воды было очень позднее (обычно наблюдается в конце июля — начале августа) и чрезвычайно кратковременное. Имеющиеся в нашем распоряжении отдельные ограниченные по таксонометрическому (с точностью до отдела) составу фитопланктона данные в табл. 1.

Уже в следующей после 23.08.2012 г. съёмке наблюдается возврат траектории в область ПОО, вблизи изоплеты $C_{ФП^д}$, $C_{МВ}$.

Таким образом, показано, что впервые по дистанционно измеряемой спектрометрической информации высокого спектрального разрешения видимой области спектра, используя метод ПОО, возможно в реальном времени на качественном уровне отслеживать изменение структурного состава фитопланктона. Траектория оптического образа либо меняется

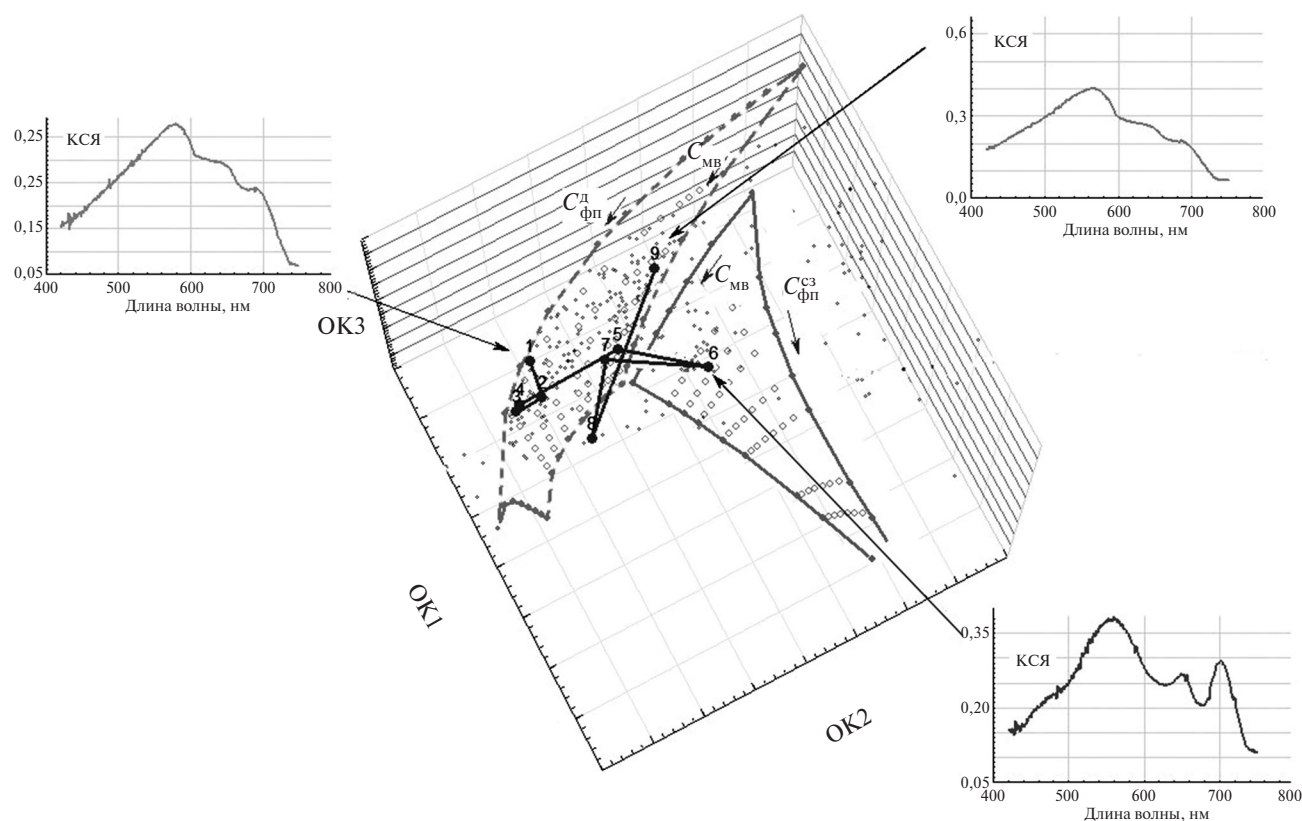


Рис. 3. Трёхмерное пространство оптических образов. Точки — экспериментальные СКСЯ, треугольники — модельные СКСЯ с доминированием синезелёных, эвгленовых, квадраты — диатомовых, динофитовых микроводорослей. Выделены поверхности, полученные на основе модельных СКСЯ с известным структурным составом. Сплошная линия, проходящая через измеренные СКСЯ (заполненные кружки), — траектория изменения состояния водной экосистемы р. Дон в 2012 г. по СКСЯ. Цифры — порядковые номера спектрометрических съёмок. Врезки — график СКСЯ, полученные в 1-, 6-, 9-й съёмке соответственно.

Таблица 1. Процентное соотношение (по биомассе) синезелёных, зелёных, диатомовых и прочих водорослей фитопланктона в р. Дон в 2012 г.

Дата съёмки	Отделы фитопланктона			
	Синезелёные	Зелёные	Диатомовые	Прочие
4.05	15,0	н/обн	65,6	19,4
16.07	40,5	36,1	23,4	н/обн
23.08	84,9	6,1	9,0	н/обн
13.09	31,1	21,5	6,0	41,4
12.11	5,4	0,1	94,5	н/обн

Примечание. К прочим относили не идентифицируемые до отдела частично разрушенные и разложившиеся клетки фитопланктона.

вблизи плоскости определённого лепестка $C_{ФП}$, $C_{МВ}$, определяемого $\alpha_{\lambda, ФП}$, показывая изменение лишь концентрации ОАК водной экосистемы, либо переходит с одного лепестка на другой, указывая на изменение структуры фитопланктона. Попадание СКСЯ между лепестками говорит о смешанном составе фитопланктона во время проведения съёмки.

Предложенный способ интерпретации данных дистанционной спектроскопии видимого диапазона

применим для съёмок с нижнего (с борта судна или любого низколетящего аппарата) и со спутникового уровней. Ограничение способа связано с необходимостью получения информации современной спектральной аппаратурой с большим (> 100) количеством каналов с разрешением не хуже 5 нм. Реализация способа меняет представление о возможностях дистанционного изучения ВО, расширяет перечень оптически активных (видимых) компонентов и понятийный базис метода ПОО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Morel A., Prieur L. // Limnol. and Oceanogr. 1977. V. 22. № 4. P. 709–722.
- Odermatt D., Gitelson A., Brando V.E., Schaepman M. // Remote Sensing Environ. 2012. T. 118. C. 116–126.
- Jupp D.L.B., Kirk J.T.O., Harris G.P. // Austral. J. Mar. Freshwater Res. 1994. V. 45. P. 801–828.
- Gitelson A.A., Schalles J.F., Rundquist D.C., Schiebe F.R., Yacobi Y.Z. // J. Appl. Phycol. 1999. V. 11. P. 345–354.
- Голубицкий Б.М., Левин И.М., Танташев М.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1974. Т. 10. № 11. С. 1235–1238.

6. Зеє Э.П. В кн.: Распространение света в дисперсной среде. Минск: Наука и техника, 1982. С. 84–105.
7. Sukhorukov B.L., Garbuzov G.P., Akawiec A.A. 7th Int. Symp. “Atm. and Ocean Optics” // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 503–510.
8. Сухоруков Б.Л., Гарбузов Г.П., Никаноров А.М. // Вод. ресурсы. 2000. № 5. С. 579–588.
9. Никаноров А.М., Трофимчук М.М., Сухоруков Б.Л. Методы экспериментальной гидроэкологии: монография. Ростов н/Д.: НОК, 2012. 309 с.
10. Garbuzov G.P., Sukhorukov B.L. Proc. 1st Int. Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibit. // Strasbourg, 1994. Vol. 3. P. 37–45.
11. Tassan S., Ferrari G.M. // Limnol. and Oceanogr. 1995. V. 40. № 8. P. 1358–1368.
12. Чурилова Т.Я., Финенко З.З., Акимов А.И. Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 301–319.

NEW POSSIBILITIES OF REMOTE SPECTROMETRY OF SURFACE WATER BODIES

B. L. Sukhorukov, Corresponding Member of the RAS A. M. Nikanorov

Received September 25, 2018

Article presents a new approach to the analysis of spectrometric data obtained by modern spectrometers in the visible range of wavelengths for surveys of surface water bodies. The efficiency of the new approach in the interpretation of spectrometric data in the visible range is shown with the use, proposed by us, of the space of optical images (SOI) formed by a combination of experimental and model ranges of the remote sensing reflectance (RS). The RS ranges calculated parallel to measuring the absorbance indexes in particular hydrological seasons with a known structural composition of phytoplankton permit us to gradate the SOI with respect to the structural composition of phytoplankton. The curve of the status of the ecosystem of the Don River constructed by the data of remote spectrometry shows changes in the structure of phytoplankton during the observation period.

Keywords: remote spectrometry, phytoplankton, remote sensing reflectance, space of optical images.

УДК 550.344.42 + 532.5

ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕВОГО ПОДАВЛЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ
ПОДВОДНЫМИ БАРЬЕРАМИБ. В. Бошенятов^{1,2,*}, К. Н. Жильцов²

Представлено академиком РАН Г.А. Поповым 29.05.2018 г.

Поступило 22.06.2018 г.

Исследованы особенности вихревого подавления волн цунами непроницаемой подводной преградой при её высоте, близкой к оптимальной, которая соответствует максимальному эффекту вихревого подавления энергии волн.

Ключевые слова: волна цунами, подводный барьер, численное моделирование, гидродинамический (волновой) лоток, вихревые структуры.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846755-759>

В работах [1–4] показано, что при определённых условиях вблизи тонких и непроницаемых подводных преград образуются крупномасштабные вихревые структуры, которые могут аккумулировать значительную часть энергии длинных (по сравнению с глубиной водоёма, $L \gg H$) волн типа цунами. Изучение этого явления является важной и актуальной задачей, поскольку использование вихревого механизма подавления длинных волн может служить основой для создания в будущем недорогих и высокоэффективных подводных преград, значительно снижающих разрушительную силу волн цунами. В работе [1] впервые было обнаружено, что существует оптимальная высота преграды $h \approx 0,85H$, при которой в вихревых структурах аккумулируется наибольшая энергия W_v , достигающая в ряде случаев 50% от энергии падающей волны W . На рис. 1 по экспериментальным данным работы [1] построен график этой зависимости.

Эксперименты [1] проводили в гидродинамическом лотке ИПРИМ РАН (длина 15 м, ширина 0,26 м и высота 0,35 м), где генерировалась гравитационная волна длиной $L = 3$ м и средней амплитудой A от 4,5 до 10 мм. Начальная глубина воды в лотке H изменялась от 100 до 103 мм. При этом $A/H < 0,1$, и, как показано в работах [5, 6], в этом случае влиянием нелинейных эффектов на энергию и скорость распространения волн можно пренебречь, $c = \sqrt{gH}$ (g — ускорение силы тяжести). Однако из тех же экспериментов следует, что при взаимодействии

волн с тонкой одиночной преградой заданной высоты наблюдается довольно значительный разброс данных по относительным энергиям отражения $W_r = W_r/W$ и энергиям вихревых потерь $W_v = W_v/W$ (рис. 1), что в ряде случаев приводило к снижению (до 30%) суммарной энергии подавления волн. Таким образом, экспериментальные факты свидетельствуют о том, что необходимы более детальные исследования с целью выявления дополнительных условий и параметров, влияющих на эффективность вихревого подавления волн типа цунами.

В данной работе приведены результаты таких исследований при оптимальной относительной высоте подводной преграды, которая соответствует максимальному эффекту вихревого подавления энергии волн $h/(H + A) = 0,855–0,875$. Преграда высотой $h = 95$ мм располагалась на расстоянии 9 м

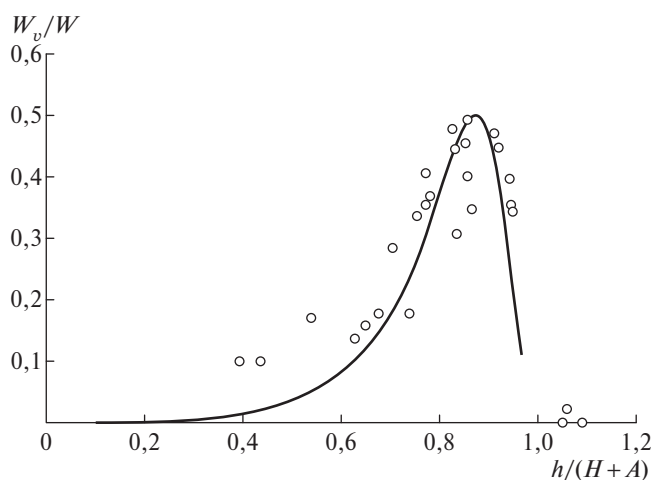


Рис. 1. Коэффициент вихревых потерь в зависимости от относительной высоты подводной преграды; точки — эксперимент [1], $A/H = 0,04–0,1$; кривая — теория [4], $A/H = 0,07$ ($k = 0,82$).

¹ Институт прикладной механики
Российской Академии наук, Москва

² Национальный исследовательский
Томский государственный университет

*E-mail: bosbosh@mail.ru

от начала лотка. Глубина воды в гидродинамическом лотке и длина генерируемой волны оставались неизменными: $H = 103$ мм, $L = 3000$ мм, а высота падающей волны изменялась от 0,5 до 16,5 мм, т.е. в более широком, чем в работе [1], диапазоне.

Исследования проводили комплексным методом, сочетая физические эксперименты в гидродинамическом лотке с численным моделированием изучаемых в лотке волновых процессов на основе полных уравнений Навье—Стокса. Описание экспериментальной установки, методика численного моделирования и методика экспериментальных исследований детально изложены в работах [6–9].

Двумерные уравнения Навье—Стокса для несжимаемой жидкости с соответствующими граничными условиями на твёрдых стенках и свободной поверхности решались методом конечных объёмов на неподвижной прямоугольной сетке с градиентом мелкости ячеек, направленным нормально к исходной плоскости раздела фаз вода—воздух, образующей свободную поверхность жидкости. Пространственная дискретизация уравнений осуществлялась на основе комбинации центральной схемы и схемы “против потока”, что обеспечивает устойчивость и точность дискретизации второго порядка. Использовалась явная схема бегущего счёта, при этом шаг по времени контролировался автоматически, чтобы оставаться много меньше шага по координате (число Куранта $< 0,6$). Программная реализация численного метода построена на основе свободно распространяемого (<http://www.openfoam.org>) вычислительного инструментария OpenFOAM.

В экспериментах при помощи четырёх резистивных датчиков [9], расположенных на различных расстояниях l_n (1,4; 6; 8,99 и 11,22 м) от начала лотка, измерялось смещение свободной поверхности воды в зависимости от времени $\xi_n(t)$. Это позволило построить волновые диаграммы $x-t$ для каждого эксперимента (ось x направлена вдоль лотка, t — время), определить скорости всех волн, а также амплитудные коэффициенты отражения $R = A_r/A$ и прохождения $T = A_t/A$ волны после её взаимодействия с преградой.

Сравнение данных численного моделирования и результатов экспериментов по измерению зависимостей $\xi_n(t)$ на различных расстояниях от генератора волн подтвердили достоверность экспериментов и адекватность программы моделирования, которая позволила визуализировать поле скоростей, в том числе вблизи преграды, и вычислять кинетическую энергию волн [6, 8] в каждом эксперименте.

Используя измеренные профили волн $\xi(t)$, можно вычислить потенциальную энергию волн

$$W_p = \frac{\rho g}{2} \sqrt{gH} \int_0^T \xi^2 dt,$$

а при $A/H < 0,1$ и полную энергию волны $W = 2W_p$ [10]. При $A/H > 0,1$ погрешность линейной теории превышает 5% и кинетическую энергию необходимо вычислять, интегрируя профиль скорости $u(y, t)$ потока жидкости за фронтом волны:

$$W_k = \frac{\rho}{2} \sqrt{gH} \int_0^T \int_0^{H+\xi} u^2 dy dt.$$

На рис. 2 по результатам численных и экспериментальных исследований дана зависимость коэффициента отражения гравитационной волны типа цунами от тонкой непроницаемой преграды в зависимости от безразмерной высоты волны. Там же (штриховая линия) показана величина коэффициента отражения волны от преграды той же высоты, но бесконечно большой протяжённости в направлении распространения волны, рассчитанная по линейной теории [10]:

$$R = \frac{\sqrt{H} - \sqrt{H-h}}{\sqrt{H} + \sqrt{H-h}} = 0,564.$$

Из рис. 2 видно, что при высоте волны $A < 0,08H$ коэффициент отражения сильно зависит от относительной высоты падающей волны. При $A/H < 0,01$ от преграды отражается менее 1% энергии падающей волны $W_r = R^2 < 0,01$. При $A/H > 0,1$ коэффициент отражения приближается к максимуму, который близок по величине к коэффициенту отражения от преграды бесконечной толщины и может быть оценён по линейной теории. Подобный характер

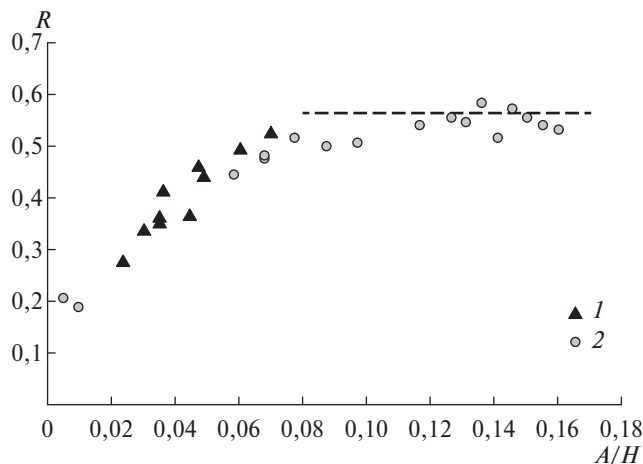


Рис. 2. Коэффициент отражения гравитационной волны типа цунами от преграды оптимальной высоты $h = 0,87(H + A)$ в зависимости от относительной высоты падающей волны; 1 — эксперимент, 2 — расчёт.

имеет и зависимость вихревых потерь энергии от параметра A/H . При $A/H < 0,005$ вихревые потери энергии на преграде составляют менее 1%. При $A/H = 0,07$ энергия вихревых потерь достигает максимума, равного 50% от энергии падающей волны, и далее, вплоть до значения $A/H = 0,16$, практически не изменяется. Отметим, что при распространении волн цунами в океане значения параметра $A/H < 0,0002$, поэтому любые подводные преграды в виде высоких горных хребтов практически не уменьшают суммарную энергию волн цунами.

В работе [4] получены теоретические зависимости для расчёта коэффициентов отражения и прохождения волн типа цунами при их взаимодействии с тонкими преградами:

$$R = \left(\frac{1-k}{1+k} P^2 \right) / \left(4 + \frac{1-k}{1+k} P^2 \right)^{-1}, \quad T = 1 - R, \\ P = \frac{h/(H+A) - A/(H+A)}{1 - h/(H+A)}. \quad (1)$$

Используя формулы (1) для коэффициента отражения и данные исследований, представленные на рис. 2, можно построить зависимость коэффициента восстановления $k = f(A/H)$, которая приведена на рис. 3.

Для натуральных волн цунами, которые распространяются в океане вдали от мелководья, коэффициент восстановления близок к единице, что соответствует “упругому” взаимодействию волны цунами с любыми подводными преградами без диссипации энергии. При этом из (1) следует, что коэффициент отражения $R = 0$, а коэффициент прохождения волны $T = 1$. С увеличением относительной высоты волны коэффициент восстановления уменьшается, при

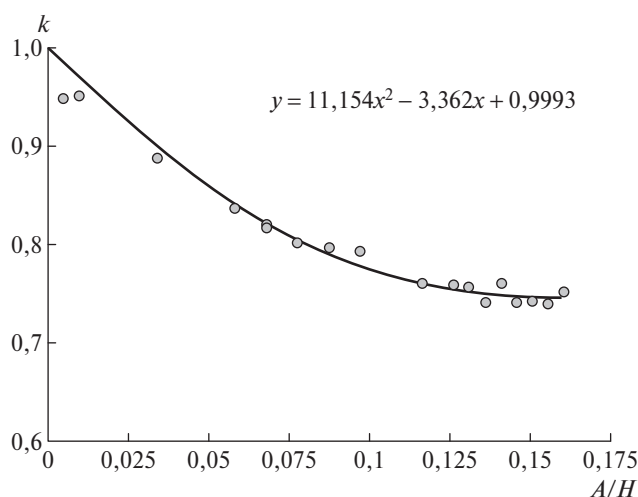


Рис. 3. Зависимость коэффициента восстановления от относительной высоты падающей волны.

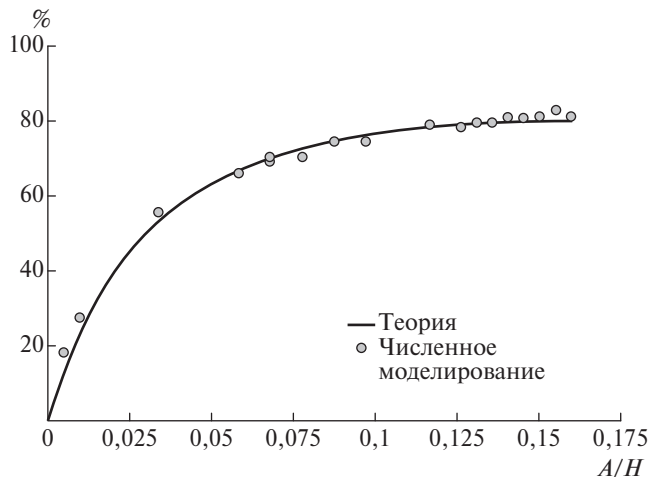


Рис. 4. Эффективность подавления волн типа цунами подводной преградой оптимальной высоты, выраженная в %, к суммарной энергии падающей волны.

этом увеличиваются как отражённая от преграды энергия, так и потери в крупномасштабных вихревых структурах. На рис. 4 с использованием теоретических формул (1) и зависимости коэффициента $k = 11,154(A/H)^2 - 3,362(A/H) + 0,9993$ (рис. 3) построена расчётная зависимость эффективности тонкой подводной преграды оптимальной высоты от безразмерной высоты падающей волны типа цунами. Там же (точки) приведены результаты прямого численного моделирования на основе полных уравнений Навье—Стокса.

При заданных условиях физического и численного экспериментов суммарная эффективность подводной преграды (коэффициент отражения и вихревые потери) увеличивается практически от нуля (при $A/H \ll 1$) до максимального значения (при $A/H > 0,1$), далее до $A/H = 0,16$ изменение слабое. При $A/H > 0,125$ тонкая и непроницаемая подводная преграда оптимальной высоты $h = 0,87(H+A)$ гасит 80% от суммарной энергии падающей волны, из них 50% энергии сосредоточено в крупномасштабных вихревых структурах.

Рассмотрим вопрос о возможности установления подобия между лабораторными экспериментами и реальными натурными условиями. В наиболее общем виде волновые процессы в жидкости описываются уравнениями Навье—Стокса. После преобразования этих уравнений к безразмерному виду получим следующие критерии подобия:

$$\frac{A}{H}, \frac{H}{L}, \frac{h}{H+A}, \frac{c}{\sqrt{gH}}, \frac{\sqrt{gH}}{L}t, \frac{x}{H}, \frac{\rho}{\eta} A \sqrt{gH}, \quad (2)$$

где ρ и η — плотность и динамическая вязкость воды соответственно. Согласно закону подобия физиче-

Таблица 1. Параметры типичных волн цунами [11]

Зона	H , км	A , м	L , км	A/H	H/L	$c/\sqrt{gH}$	Re
Океан	4	1	400	0,00025	0,01	1	$2 \cdot 10^8$
Континентальный шельф	0,150	2,25	80	0,015	0,0019	1	$9 \cdot 10^8$
Мелководье	0,015	4	30	0,27	0,0005	1,15	$6 \cdot 10^7$
Наши эксперименты и численные расчёты	0,0001	$(0,5-16) \cdot 10^{-3}$	0,003	0,005–0,15	0,033	1–1,1	10^4

ская модель в точности отражает натурные явления, если все безразмерные критерии (2) имеют одинаковые значения в модельном эксперименте и в природе. В табл. 1 приведены параметры типичных волн цунами при различных условиях, полученные в работе [11].

Ясно, что воспроизвести в наземных установках натурные значения всех перечисленных в (2) критериев подобия невозможно. Так, например, даже в крупномасштабных волновых лотках длиной 300 м и более удаётся смоделировать числа Рейнольдса $Re \approx 10^6$, что в 100 раз меньше натурных значений. В наших экспериментах числа $Re \approx 10^4$, остальные критерии (2) за счёт повышения точности измерений [9] приближены к натурным и соответствуют крупномасштабным волновым лоткам. Поскольку обеспечить в экспериментах полного подобия натурным условиям невозможно, то при моделировании волн цунами в лабораторной установке необходимо:

проводить комплексные теоретические, экспериментальные и численные исследования;

из списка (2) выбирать наиболее важные для изучаемого явления критерии подобия;

исследовать критериальные зависимости с целью установления областей автомодельности, в которых зависимость от того или иного критерия подобия исчезает.

Видно, что зависимости, показанные на рис. 2 и 4, автомодельны и легко могут быть экстраполированы на значение параметра $A/H = 0,27$, характерного для мелководья. Есть основания полагать, что критериальные зависимости изучаемых в данной работе явлений от числа Рейнольдса зависят слабо (автомодельны при $Re > Re_{\text{exp}} \approx 10^4$), однако доказательство этого факта требует дополнительных исследований. В этом случае, как показано в [12], подобие по всем критериям (2), кроме числа Re , обеспечивается масштабным переходом от модели к натуре, если все линейные размеры увеличить в n раз, а время увеличить в $\sqrt{n}$ раз. В этом легко убедиться

простой подстановкой указанных преобразований в соответствующие критерии подобия (2).

Источники финансирования. Работа осуществлена в рамках научного проекта № 8.1.33.2018 при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ. Экспериментальная часть работы выполнена в рамках государственного задания (номер гос. регистрации темы АААА-А19-119012290136-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бошеняттов Б.В. // ДАН. 2013. Т. 452. № 4. С. 392–395.
2. Boshenyatov D.V., Zhiltsov K.N. Simulation of the Interaction of Tsunami Waves with Underwater Barriers // Amer. Inst. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 1770. № 3. P. 030088.
3. Yun-Ta Wu, Shih-Chun Hsiao. Propagation of Solitary Waves over Double Submerged Barriers // Water. 2017. V. 9. P. 917–933.
4. Бошеняттов Б.В. // ДАН. 2017. Т. 477. № 4. С. 485–487.
5. Бошеняттов Б.В., Попов В.В. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/3. С. 145–150.
6. Бошеняттов Б.В., Лисин Д.Г. // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2013. № 6 (26). С. 45–55.
7. Бошеняттов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В., Семянистый А.В. // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 116–118.
8. Бошеняттов Б.В., Жильцов К.Н. // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2018. № 51. С. 86–103.
9. Бошеняттов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В. Устройство измерения уровня воды // Пат. РФ № 2485452. Приоритет 07.10.2010. Заявка № 2010141060. Зарегистрировано 20.06.2013 // Бюл. 2013.
10. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
11. Madsen P.A., Fuhrman D.R., Schaffer H.A. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C12012. DOI: 10.1029/2008JC004932.
12. Фридман А.Н., Альперович Л.С., Шмер Л. и др. // УФН. 2010. Т. 180. № 8. С. 843–850.

FEATURES OF VORTICAL SUPPRESSION OF TSUNAMI WAVES UNDERWATER BARRIERS

B. V. Boshenyatov, K. N. Zhiltsov

Presented by Academician of the RAS G.A. Popov May 29, 2018

Received June 22, 2018

The features of vortical suppression of tsunami waves by an impermeable underwater barrier have been studied. The height of the barrier is close to the optimum corresponding to the maximum effect of vortical suppression of the wave energy. It is shown that the energy of suppressing tsunami waves by such a barrier depends on the wave height and can vary from zero to 80% of the incident wave energy.

Keywords: tsunami wave, underwater barrier, numerical simulation, hydrodynamic (wave) flume, vortex structures.

УДК 577.15

СТЕРОИДОГЕННЫЙ ЭФФЕКТ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО АГОНИСТА РЕЦЕПТОРА ЛЮТЕИНИЗИРУЮЩЕГО ГОРМОНА ПРИ ЕГО ВВЕДЕНИИ КРЫСАМ-САМЦАМ

А. А. Бахтюков¹, К. В. Деркач¹, Д. В. Дарьин², А. О. Шпаков^{1,*}

Представлено академиком РАН Л. Г. Магазаником 03.07.2018 г.

Поступило 02.08.2018 г.

Производное тиенопиримидина TP03 (низкомолекулярный агонист рецептора лютеинизирующего гормона, ЛГР) при введении крысам-самцам популяции Wistar стимулировало продукцию тестостерона (“Т”), повышенный уровень которого сохранялся в течение 7 дней, и повышало экспрессию гена ЛГР. В то же время стероидогенный эффект хорионического гонадотропина человека (ХГЧ), который значительно повышал уровень “Т” в первый день обработки, в дальнейшем ослаблялся, что сопровождалось снижением в семенниках экспрессии гена ЛГР, свидетельствующим о развитии резистентности клеток Лейдига к ХГЧ. При обработке ХГЧ в семенниках регистрировали компенсаторное повышение экспрессии генов стероидогенных ферментов — цитохрома P450_{sc} и дегидрогеназы 3β-HSD. При обработке TP03 этот эффект отсутствовал.

Ключевые слова: низкомолекулярный агонист рецептора лютеинизирующего гормона, тиенопиримидины, тестостерон, хорионический гонадотропин человека, стероидогенез.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846760-763>

Гонадотропины, лютеинизирующий гормон (ЛГ) и хорионический гонадотропин человека (ХГЧ), действие которых осуществляется через рецептор, в настоящее время широко используются для коррекции дисфункций репродуктивной системы у мужчин и женщин, а также во вспомогательных репродуктивных технологиях. Однако применение гонадотропинов в клинике сопряжено с рядом нежелательных эффектов, среди которых синдром гиперстимуляции яичников и быстрое развитие резистентности тканей-мишеней [1–3]. Наряду с этим природные формы гонадотропинов, выделяемые из мочи, характеризуются высокой степенью гетерогенности, а рекомбинантные формы существенно отличаются от природных гонадотропинов по спектру специфической активности [1, 4]. Всё вышесказанное свидетельствует о том, что одной из актуальных задач молекулярной эндокринологии является разработка новых агонистов рецептора ЛГ/ХГЧ [5, 6].

Наибольший интерес среди них представляют тиенопиримидиновые производные, в том числе синтезированный и изученный нами ранее 5-амино-

N-трет-бутил-2-(метилсульфанил)-4-(3-(никотинамидо)фенил)тиено[2,3-*d*]пиримидин-6-карбоксамид (TP03). Это соединение селективно стимулирует у крыс аденилатциклазную сигнальную систему в мембранах клеток тестикул, не влияя на фосфоинозитидные сигнальные пути [7]. При пероральном и внутрибрюшинном введении крысам-самцам повышает у них уровень тестостерона (“Т”), эти эффекты TP03 сопоставимы с таковыми ХГЧ [8]. Поскольку имеются данные о том, что при многократной обработке ХГЧ чувствительность к нему клеток Лейдига, в которых осуществляется синтез “Т”, снижается [1, 4, 9], то остро встает вопрос о сохранении стероидогенного эффекта TP03 при его длительном применении.

Целью работы было сравнительное изучение влияния длительной обработки крыс-самцов с помощью TP03 и ХГЧ на уровень “Т” в крови и экспрессию генов рецептора ЛГ/ХГЧ и ключевых стероидогенных белков в семенниках. Исследовали экспрессию генов *Lhr*, *Star*, *Cyp11a1* и *Hsd3b*, кодирующих соответственно рецептор ЛГ/ХГЧ, белок StAR, обеспечивающий стадию, лимитирующую скорость синтеза “Т” — транспорт холестерина в митохондрии, цитохром P450_{sc}, катализирующий превращение холестерина в прегненолон в митохондриях, и 3β-гидроксистероиддегидрогеназу (3β-HSD), катализирующую превращение прегне-

¹ Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова Российской Академии наук, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет

*E-mail: alex_shpakov@list.ru

нолона в прогестерон в эндоплазматическом ретикулеуме [10, 11].

Использовали трёхмесячных крыс-самцов Wistar, которым внутрибрюшинно вводили TP03 ежедневно в течение недели в дозе 15 мг/кг (группа 2) или по такой же схеме подкожно ХГЧ по 100 МЕ каждому животному (группа 3). Препараты вводили в 11.00. Крысам контрольной группы (группа 1) вместо препаратов вводили стерильный физиологический раствор. Концентрацию “Т” в образцах крови, полученных из хвостовой вены животных, определяли с помощью набора Тестостерон-ИФА (“Алкор-Био”, Россия). Величину концентрации “Т” определяли до начала эксперимента и через 3 ч после введения препаратов ежедневно в течение недели обработки крыс ХГЧ или TP03. По окончании экспериментов животных декапитировали под наркозом и извлекали образцы ткани семенников для оценки в них генной экспрессии. Все процедуры выполняли в соответствии с требованиями Этического комитета ИЭФБ РАН и European Communities Council Directive 1986 (86/609/EEC).

Экспрессию генов определяли с помощью количественной ПЦР, для чего из тканей семенников с помощью TRIzol Reagent (“ThermoFisher Scientific”, США) выделяли суммарную РНК. Кодировочную ДНК получали обратной транскрипцией, используя набор MMLV RT Kit (“Евроген”, Россия). Смесь для амплификации содержала 10 нг ПЦР-продукта, прямой и обратный праймеры (0,4 мкМ), среду qPCRmix-HS SYBR + LowROX (“Евроген”). Измерение амплификационных сигналов проводили с помощью прибора 7500 Real-Time PCR System (“ThermoFisher Scientific”). В качестве референсных использовали гены глицеральдегидфосфатдегидрогеназы (*Gapdh*) и β -актина (*Actb*). Структуры праймеров идентичны использованным нами ранее [12]. Анализ результатов проводили с помощью порогового метода $\Delta\Delta C_t$. Значения RQ рассчитывали как отношение показателей к таковым контрольной группы.

Статистический анализ данных проводили с помощью метода ANOVA (программа компании “Manugistics Inc.”, США). Различия между пробами оценивали с помощью критерия *t* Стьюдента и рассматривали как достоверные при $p \leq 0,05$.

Мы обнаружили, что ХГЧ и TP03 начиная с первого дня обработки достоверно повышали уровень “Т” при сравнении с показателями контрольных животных. Однако динамика изменения стимулирующего эффекта ХГЧ и TP03 была разной. При обработке крыс ХГЧ в первый день при-

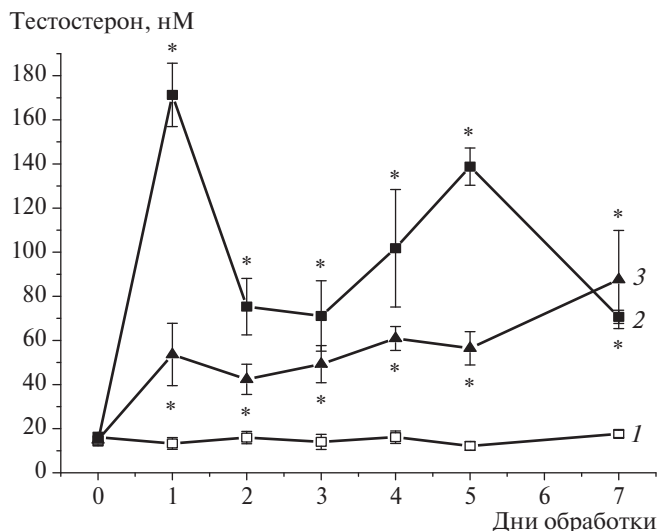


Рис. 1. Влияние семидневной обработки самцов крыс с помощью ХГЧ или TP03 на уровень тестостерона в крови животных. 1 — контроль, 2 — ХГЧ, 3 — TP03; $2M \pm S.E.M.$, $n = 5$ для каждой группы, $*p < 0,05$ при сравнении с контролем.

рост концентрации “Т” был максимальным и составил 158 ± 15 нМ ($n = 5$). Затем он снизился и на 5-й день вновь повысился, хотя и в меньшей степени, и впоследствии опять ослабел (рис. 1). Стимулирующее влияние TP03 изменялось в существенно меньшей степени и достигало максимума на 7-й день эксперимента. Необходимо отметить, что если в первый день обработки прирост концентрации “Т”, вызываемый TP03, был в 4 раза ниже такового для ХГЧ, то к концу эксперимента стероидогенные эффекты препаратов были сопоставимыми (рис. 1). Полученные результаты указывают на то, что при однократном введении стимулирующий продукцию “Т” эффект TP03 был ниже, чем в случае ХГЧ. Однако при длительном введении эффект TP03, в отличие от такового ХГЧ, сохранялся и даже усиливался.

Одной из причин различий стероидогенной активности TP03 и ХГЧ могли быть специфические изменения чувствительности к ним рецепторов ЛГ/ХГЧ в клетках Лейдига. Об этом свидетельствовали наши данные о влиянии обработки ХГЧ и TP03 на экспрессию гена *Lhr*, кодирующего рецептор ЛГ/ХГЧ в клетках семенников крыс. После однократного введения ХГЧ мы зарегистрировали двукратное снижение экспрессии гена *Lhr*. Сниженный уровень сохранялся через 3 и 7 дней после начала обработки (рис. 2). После однократного введения TP03 мы наблюдали лишь тенденцию к снижению экспрессии гена *Lhr*, но через 7 дней она парадоксальным образом повысилась в 3 раза (рис. 2). По-

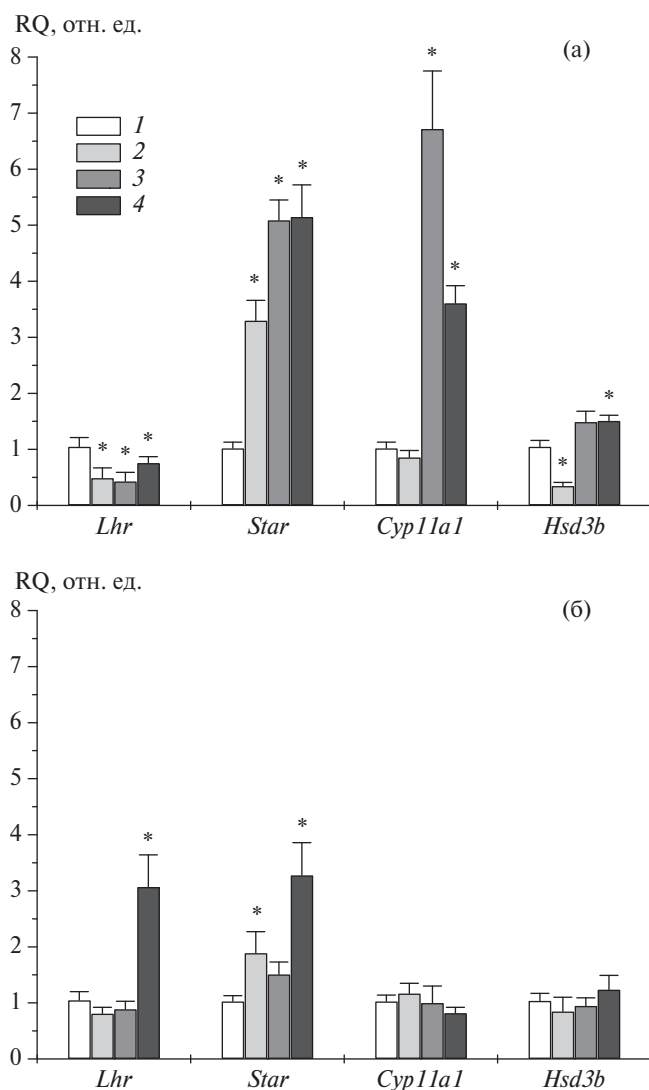


Рис. 2. Влияние обработки крыс-самцов с помощью ХГЧ (а) и ТР03 (б) на экспрессию генов *Lhr*, *Star*, *Cyp11a1* и *Hsd3b*, кодирующих рецептор ЛГ/ХГЧ и стероидогенные белки в клетках семенников. 1 — без обработки, 2 — однократное введение, 3 — введение в течение 3-х дней, 4 — введение в течение 7-ми дней. Уровень экспрессии мРНК генов нормировали по уровню экспрессии мРНК генов *Gapdh* и *Actb*. Значения RQ рассчитаны по отношению к контрольной группе. * — различия с контролем статистически значимы при $p < 0,05$. Значения представлены как $M \pm SEM$. $n = 5$.

лученные результаты свидетельствовали о значительном снижении экспрессии гена *Lhr* в клетках семенников крыс при их обработке ХГЧ, что привело к развитию резистентности клеток Лейдига к гонадотропинам с ЛГ-активностью. Введение ТР03 не только не повлияло, но при длительном введении усилило экспрессию гена *Lhr*, сохраняя чувствительность семенников к агонистам рецептора ЛГ/ХГЧ. Это хорошо соответствовало динамике изменения

стероидогенного эффекта ТР03. Необходимо отметить, что развитие резистентности гонад к действию гонадотропинов является одной из ключевых проблем их применения для лечения репродуктивных дисфункций и во вспомогательных репродуктивных технологиях [2, 13]. Как показали наши исследования, ТР03 в этом отношении является хорошей альтернативой гонадотропинам.

Далее мы исследовали влияние однократной и длительной обработки крыс ХГЧ и ТР03 на экспрессию генов основных белков стероидогенеза в семенниках животных. Экспрессия гена *Star* при всех сроках обработки обоими препаратами была повышена. Однако в случае ХГЧ это повышение было более выраженным — в среднем в 3–5 раз (рис. 2). Мы зафиксировали следующую закономерность: чем в большей степени снижались экспрессия гена *Lhr* и стимулирующее влияние препарата на продукцию “Т”, тем в большей степени повышалась экспрессия гена *Star* (рис. 2). Это может указывать на компенсаторный характер такого повышения в клетках Лейдига в условиях ослабления передачи в них генерируемого гонадотропинами сигнала и, как следствие, снижения стимулирующего влияния протеинкиназы А (основная мишень агонистов рецептора ЛГ/ХГЧ) на активность белка StAR. Повышение экспрессии гена *Star* при действии высоких доз ХГЧ на клетки Лейдига в условиях *in vitro* отмечали и другие авторы [9].

В условиях многодневной обработки крыс ХГЧ существенно повысилась экспрессия гена *Cyp11a1*, а на 7-й день мы зарегистрировали статистически значимое повышение экспрессии гена *Hsd3b* (рис. 2). Все эти изменения также являются составляющими компенсаторной реакции, развивающейся в условиях резистентности клеток Лейдига к гонадотропинам и ослабления стимулируемых ими сигнальных каскадов, мишенями которых являются цитохром P450_{sc} и 3 β -HSD [10, 11]. Наряду с этим в первый день обработки гонадотропином мы выявили снижение на 67% экспрессии гена *Hsd3b*. Снижение экспрессии 3 β -HSD в культуре клеток Лейдига при их обработке высокими дозами ХГЧ ранее было показано в работе [14]. Примечательно, что в случае использования для обработки крыс ТР03 изменений экспрессии генов, кодирующих цитохром P450_{sc} и 3 β -HSD, мы не наблюдали (рис. 2).

Таким образом, мы показали, что ТР03, низкомолекулярный агонист рецептора ЛГ/ХГЧ, при обработке им крыс-самцов в течение 7 дней устойчиво повышал продукцию “Т”, сохраняя, а на 7-й день повышая экспрессию гена, кодирующего рецептор

ЛГ/ХГЧ, и существенно не влияя на экспрессию генов основных ферментов стероидогенеза (цитохрома P450_{sc}, 3 β -HSD) в клетках семенников, что свидетельствует о сохранении чувствительности клеток Лейдига к эндогенным гонадотропинам и об адекватном ответе системы стероидогенеза на её активацию агонистами рецептора ЛГ/ХГЧ. Хорионический гонадотропин человека вызывал сильный подъём уровня “Т” в первый день обработки, но в последующие дни его стероидогенный эффект снизился, что сопровождалось снижением в клетках семенников экспрессии гена *Lhr*, свидетельствующим о развитии резистентности клеток Лейдига к гонадотропинам, и компенсаторным повышением экспрессии транспортного белка StAR и ферментов стероидогенеза. Всё это привело к ослаблению ответа семенников на эндогенные гонадотропины и является механизмом, который обуславливает развитие резистентности к ним тканей-мишеней [1, 4, 15].

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16–04–00126 и частично государственного задания № АААА–А18–118012290427–7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ezcurra D., Humaidan P. // *Reprod. Biol. Endocrinol.* 2014. V. 12. P. 95.
2. Banker M., Garcia-Velasco J.A. // *J. Hum. Reprod. Sci.* 2015. V. 8. P. 13–17.
3. Riccetti L., De Pascali F., Gilioli L., et al. // *Reprod. Biol. Endocrinol.* 2017. V. 15. P. 2.
4. Cole L.A. // *Reprod. Biol. Endocrinol.* 2012. V. 10. P. 24.
5. van de Lagemaat R., Raafs B.C., van Koppen C., et al. // *Endocrinology.* 2011. V. 152. P. 4350–4357.
6. Шнаков А.О. // *Цитология.* 2015. Т. 57. № 3. С. 167–176.
7. Derkach K.V., Dar'in D.V., Bakhtyukov A.A., et al. // *Biochemistry (Moscow). Suppl. Ser. A: Memb. Cell Biol.* 2016. V. 10. P. 294–300.
8. Derkach K.V., Bakhtyukov A.A., Shpakov A.A., et al. // *Cell Tissue Biol.* 2017. V. 11. P. 475–482.
9. Lejeune H., Sanchez P., Chuzel F., et al. // *Mol. Cell. Endocrinol.* 1998. V. 144. P. 59–69.
10. Payne A.H., Hales D.B. // *Endocr. Rev.* 2004. V. 25. P. 947–970.
11. Aghazadeh Y., Zirkin B.R., Papadopoulos V. // *Vitam. Horm.* 2015. V. 98. P. 189–227.
12. Бахтыков А.А., Соколова Т.В., Дар'ин Д.В. и др. // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова.* 2017. Т. 103. № 10. С. 1181–1192.
13. Riccetti L., Yvenc R., Klett D., et al. // *Sci. Rept.* 2017. V. 7. P. 940.
14. Tang P.Z., Tsai-Morris C.H., Dufau M.L. // *Endocrinology.* 1998. V. 139. P. 4496–4505.
15. Keenan D.M., Iranmanesh A., Veldhuis J.D. // *Amer. J. Physiol.* 2011. V. 300. P. 349–350.

THE STEROIDOGENIC EFFECT OF A LOW-MOLECULAR AGONIST OF LUTEINIZING HORMONE RECEPTOR IN THE COURSE OF ITS ADMINISTRATION TO MALE RATS

A. A. Bakhtyukov, K. V. Derkach, D. V. Dar'in, A. O. Shpakov

Presented by Academician of the RAS L.G. Magazanik July 3, 2018

Received August 2, 2018

The thienopyrimidine derivative TP03 (a low molecular weight agonist of the luteinizing hormone receptor, LHR), when administered to male Wistar rats, stimulated the production of testosterone (“T”), elevated level of which was maintained for 7 days, and increased the expression of the LHR gene. At the same time, the steroidogenic effect of human chorionic gonadotropin (hCG), which significantly increased the “T” level on the first day of treatment, was further weakened, which was accompanied by a decrease in the expression of the LHR gene in the testes, indicating the development of resistance of Leydig cells to hCG. In the testes, the hCG treatment induced a compensatory increase in the expression of genes of the steroidogenic enzymes, such as the cytochrome P450_{sc} and the dehydrogenase 3 β -HSD. In the case of TP03 treatment this effect was absent.

Keywords: low molecular weight agonist of the luteinizing hormone receptor, thienopyrimidines, testosterone, human chorionic gonadotropin, steroidogenesis.

УДК 611.24:611.018.6–073.584–092.9

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДЕЦЕЛЛЮЛЯРИЗАЦИИ
И РЕЦЕЛЛЮЛЯРИЗАЦИИ ТКАНЕИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МЕТОДОМ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

**Е. А. Губарева¹, Е. В. Куевда¹, А. Х. Каде¹, И. М. Быков¹,
И. И. Павлюченко¹, Т. В. Гайворонская¹, А. Н. Сидоренко¹, О. В. Цымбалов¹,
В. Г. Овсянников¹, В. В. Мясникова¹, Д. И. Шашков², С. С. Джима^{2,*}**

Представлено академиком РАН В.А. Ткачуком 03.10.2018 г.

Поступило 15.10.2018 г.

Установлено, что показатели интенсивности хемилюминесценции в нативных и рецеллюляризованных тканях мышечных органов крыс, а также в их децеллюляризованных матриксах могут служить одним из экспресс-критериев, позволяющих наряду с ультраструктурным анализом осуществлять количественную оценку жизнеспособности клеточных структур в биологических образцах диафрагмы.

Ключевые слова: хемилюминесценция, внеклеточный матрикс, рецеллюляризация, диафрагма, свободные радикалы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846764-767>

Одной из многообещающих стратегий в современной трансплантологии может стать тканеинженерный подход для создания конструкций, способных структурно и функционально соответствовать нативным органам [1]. Оценка качества полученных каркасов, основанная на изучении жизнеспособности клеточных структур в децеллюляризованных и рецеллюляризованных матриксах, является важнейшей задачей современной регенеративной медицины [2]. Известно значение реакций свободнорадикального окисления в регуляции биологических процессов, в том числе обеспечивающих жизнедеятельность клеток, их рост, дифференцировку и старение [3, 4]. В связи с этим исследование показателей интенсивности образования свободных радикалов в нативных и рецеллюляризованных тканях органов человека и животных, а также в децеллюляризованных матриксах может служить одним из экспресс-критериев, позволяющих осуществлять количественную оценку жизнеспособности клеточных структур. Указанные параметры позволяют определять качество выполненных мероприятий при децеллюляризации тканей и после рецеллюляризации матрикса аллогенными или аутологичными клетками. В живых клетках при физиологических условиях стационарная концентрация

свободных радикалов достаточно низкая, тем не менее современные способы их обнаружения и идентификации позволяют выявлять их с высокой точностью [5]. Метод хемилюминесценции является весьма чувствительным для обнаружения свободных радикалов, так как определяет не стационарную их концентрацию, а скорость реакции, при которой они образуются [5–7], что расширяет возможности экспресс-изучения особенностей свободнорадикального окисления в нативных, децеллюляризованных и рецеллюляризованных тканях мышечных органов.

Цель настоящей работы — разработка нового эффективного биофизического способа оценки степени децеллюляризации внеклеточного матрикса и жизнеспособности клеточных структур рецеллюляризованных мышечных тканей, основанного на ультраструктурном анализе и количественной оценке интенсивности генерации в них свободных радикалов.

Протоколы экспериментальных исследований на животных на базе лаборатории фундаментальных исследований в области регенеративной медицины Кубанского государственного медицинского университета были одобрены локальным Этическим комитетом (Краснодар, протокол № 21/1). Перед выполнением оперативных вмешательств животным внутрибрюшинно вводили летальную дозу барбитуратов (150 мг/кг), за час до операции инъекцировали гепарин в дозе 100 ЕД. После эксплантации

¹ Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар

² Кубанский государственный университет, Краснодар

*E-mail: jimack@mail.ru

диафрагмы выполняли направленную децеллюляризацию детергент-энзиматическим методом по разработанным ранее протоколам [1, 8, 9]. Образцы нативной и децеллюляризированной диафрагмы крыс фиксировали в 10%-м нейтральном забуференном фосфатами формалине, дегидратировали и заключали в парафин по стандартной методике с помощью автоматического гистопроцессора Leica TP1020 ("Leica Biosystems", Германия) и модульной установки Leica EG1150H ("Leica Biosystems"). Белки внеклеточного матрикса визуализировали с помощью иммуногистохимического анализа. В качестве первичных антител использовали мышинные моноклональные антитела против эластина (ab21610, "Abcam", Великобритания), коллагена типа IV (ab6586, "Abcam"), коллагена типа I (ab34710, "Abcam"), ламинина (ab11575, "Abcam"), фибронектина (ab6328, "Abcam"). Полученные микропрепараты анализировали с помощью микроскопа Olympus IX51 ("Olympus", Япония).

Изучение свободнорадикального окисления проводили с помощью аппаратно-программного комплекса Хемилуминометр Lum-5773 (МГУ, Россия) и программы PowerGraph 3.x Professional [5, 6]. При подготовке к исследованию регистрировали фоновое свечение (ФС) хемилуминометра при пустом кюветном отделении и далее определяли светосумму собственной хемилуминесценции (ССХ) биообъекта; светосумму индуцированной хемилуминесценции (СИХ), которую инициировали путём введения в кювету 0,3%-го раствора перекиси водорода в объёме 100 мкл; максимальную интенсивность индуцированной хемилуминесценции (МИИХ); восходящий и нисходящий наклоны вспышки индуцированной хемилуминесценции (вНВХ и нНВХ). Затем рассчитывали произведение $\text{вНВХ} \times \text{нНВХ}$, полученные результаты выражали в условных единицах. При выполнении измерений использовали стеклянные кюветы диаметром 10 ± 1 мм и высотой от 30 до 70 мм. Диаметр исследуемых биологических образцов ткани составлял $6,0 \pm 0,5$ мм, толщина $4,0 \pm 0,5$ мм.

Статистическую обработку полученных экспериментальных данных проводили с помощью методов вариационной статистики. Статистически достоверными полагали различия при $p \leq 0,05$.

Иммуногистохимическое исследование внеклеточного матрикса не показало выраженных качественных изменений его состава (данные не представлены). Показатель ССХ нативной ткани диафрагмы был в 1,75 раза меньше, чем для децеллюляризированной ткани, и был равен 1,137 усл. ед.

После добавления к тканям 0,3%-го раствора перекиси водорода мы наблюдали изменение площади хемилуминесценции: СИХ децеллюляризованного матрикса диафрагмы была ниже на 47% по сравнению с такой нативной тканью (59,8 усл. ед.). Значение МИИХ нативных тканей диафрагмы достоверно не отличалось от МИИХ децеллюляризованной ткани.

Таким образом, в образцах рецеллюляризированной диафрагмы мы обнаружили выраженный рост всех исследуемых показателей, что может свидетельствовать о наличии в рецеллюляризованных тканях значительного количества жизнеспособных клеток (рис. 1), обладающих повышенной биохимической активностью [10]. Весьма вероятно, что в децеллюляризованной ткани диафрагмы происходит генерация свободных радикалов в большем количестве, чем в клетках нативных тканей. Это приводит к превалированию прооксидантных факторов в регенерированных тканях, что является, по-видимому, одной из причин меньшей устойчивости рецеллюляризованных клеток по сравнению с аналогичными нативными клетками к неблагоприятным внешним воздействиям в процессе их хранения.

Мы также выявили достоверные изменения показателей хемилуминесценции нативных, децеллюляризованных и рецеллюляризованных тканей мышечных органов при изучении формы индуцированной вспышки хемилуминесценции. Для нативных и рецеллюляризованных тканей, в отличие от децеллюляризованных тканей, во всех без исключения изученных в настоящей работе случаях было характерно резкое нарастание вНВХ, а затем выраженное снижение нНВХ (табл. 1). Произведение $\text{вНВХ} \times \text{нНВХ}$ было всегда достоверно выше (на 99%) у нативных тканей диафрагмы такого децеллюляризованных тканей. Ещё более высокое значение этого показателя было характерно для рецеллюляризованных тканей: он был больше $\text{вНВХ} \times \text{нНВХ}$ нативных тканей на 568%. Таким образом, используемый в работе параметр $\text{вНВХ} \times \text{нНВХ}$ позволяет достаточно объективно контролировать эффективность децеллюляризации и рецеллюляризации в мышечных органах с помощью хемилуминесценции.

Итак, на основании полученных результатов мы установили, что хемилуминесценция является методом, позволяющим наряду с ультраструктурным анализом дифференцировать нативные, децеллюляризованные и рецеллюляризованные ткани мышечных органов. Мы также впервые обнаружили,

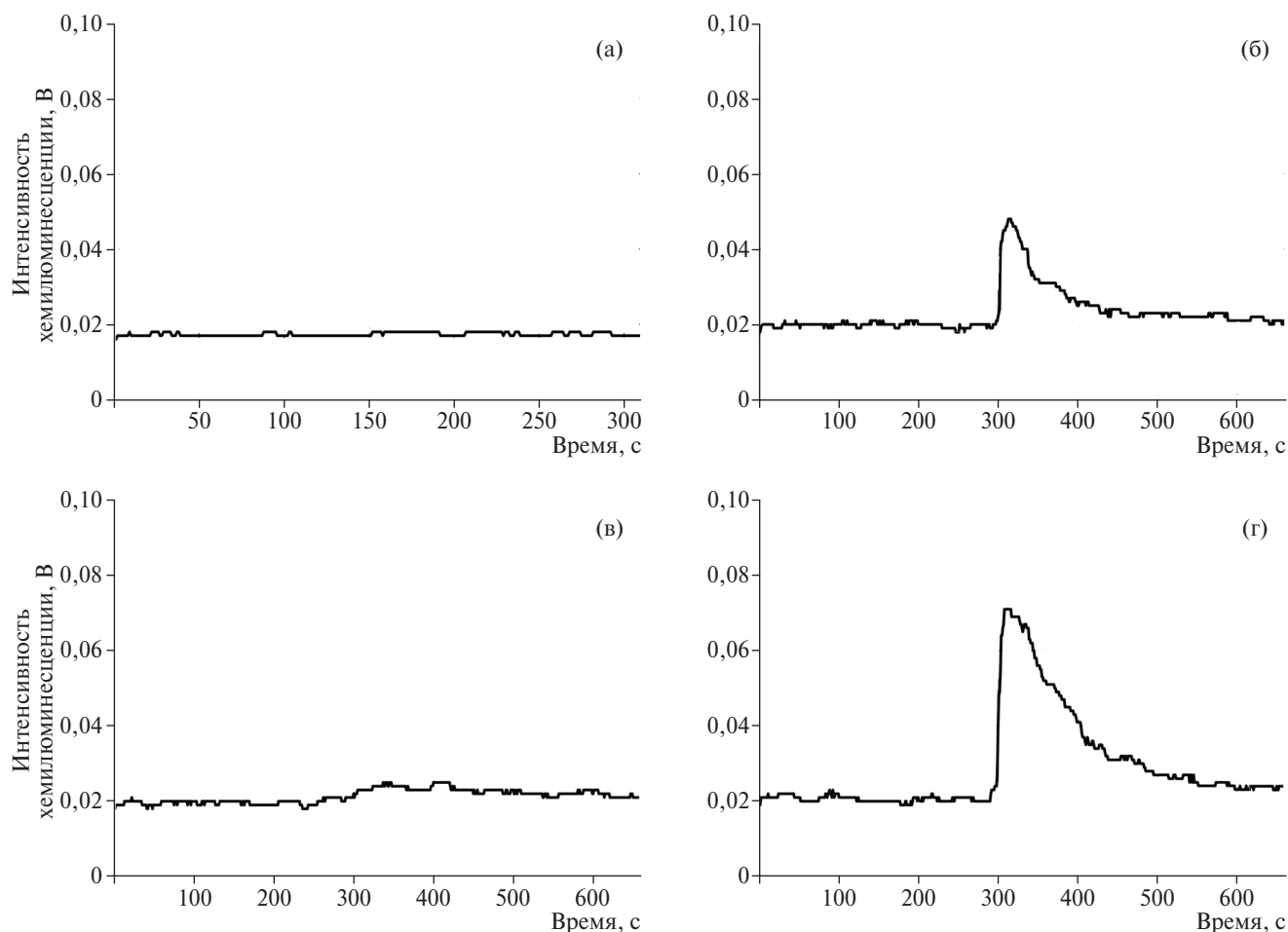


Рис. 1. Показатели хемилюминесценции нативной (б), децеллюляризованной (в), рецеллюляризованной (г) ткани диафрагмы крыс, измеренные после регистрации фонового значения (а) хемилюминесценции.

Таблица 1. Показатели восходящего и нисходящего наклонов индуцированной H_2O_2 вспышки хемилюминесценции нативных, децеллюляризованных и рецеллюляризованных тканей диафрагмы

Объект	P_{25}	M	P_{75}
вНВХ диафрагмы (нативная, $n = 5$)	$2,993 \cdot 10^{-3}$	$3,164 \cdot 10^{-3}$	$3,743 \cdot 10^{-3}$
вНВХ диафрагмы (децеллюляризованная, $n = 5$)	$2,899 \cdot 10^{-3}$	$3,016 \cdot 10^{-3}$	$3,132 \cdot 10^{-3}$
вНВХ диафрагмы (рецеллюляризованная, $n = 4$)	$1,115 \cdot 10^{-2}$	$1,337 \cdot 10^{-2}$	$1,559 \cdot 10^{-2}$
нНВХ диафрагмы (нативная, $n = 5$)	$-1,466 \cdot 10^{-4}$	$-1,396 \cdot 10^{-4}$	$-1,341 \cdot 10^{-4}$
нНВХ диафрагмы (децеллюляризованная, $n = 5$)	$-7,080 \cdot 10^{-5}$	$-6,665 \cdot 10^{-5}$	$-6,251 \cdot 10^{-5}$
нНВХ диафрагмы (рецеллюляризованная, $n = 4$)	$-2,523 \cdot 10^{-4}$	$-2,137 \cdot 10^{-4}$	$-1,751 \cdot 10^{-4}$

Примечание. M — средняя арифметическая, P — перцентиль.

что графики хемилюминесценции нативных и рецеллюляризованных тканей диафрагмы достоверно отличались от графиков хемилюминесценции тех же мышечных тканей после децеллюляризации. Наиболее показательной в этом отношении была регистрация параметра $вНВХ \times нНВХ$. По этому признаку исследуемые ткани диафрагмы можно расположить в следующий ряд: децеллюляризованные ткани < нативные ткани < рецеллюляризованные ткани, что позволяет рекомендовать

$вНВХ \times нНВХ$ в качестве основного критерия оценки эффективности проведения как децеллюляризации, так и рецеллюляризации.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке комплексной НИР “Клеточные механизмы регенерации интраторакальных органов и тканей. Разработка тканеинженерных конструкций с использованием биологических и синтетических каркасов” и государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 6.5882.2017/БЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gubareva E.A., Sjöqvist S., Gilevich I.V., et al. // *Bio-materials*. 2016. V. 77. P. 320–335.
2. Badylak S.F., Taylor D., Uygun K. // *Ann. Rev. Biomed. Eng.* 2011. V. 13. P. 27–53.
3. Скулачев В.П. // *Биохимия*. 2012. Т. 77. № 7. С. 827–846.
4. Джатдоева А.А., Полимова А.М., Проскурнина Е.В., Владимиров Ю.А. // *Вестн. Рос. гос. мед. ун-та*. 2016. № 1. С. 54–60.
5. Sozarukova M.M., Polimova A.M., Proskurnina E.V., Vladimirov Y.A. // *Biophysics*. 2016. V. 61. № 2. P. 284–290.
6. Izmailov D.Y., Proskurnina E.V., Shishkanov S.A., et al. // *Biophysics*. 2017. V. 62. № 4. P. 557–564.
7. Bykov I.M., Basov A.A., Malyshko V.V., et al. // *Bull. Exp. Biol. and Med.* 2017. V. 163. № 2. P. 268–271.
8. Kuevda E., Gubareva E., Gilevich I., et al. // *Proc. World Conf. on Regenerative Medicine // Regenerative Medicine*. 2013. V. 8. Suppl. 6. P. 21.
9. Sotnichenko A.S., Gubareva E.A., Gilevich I.V., et al. // *Cell. Transplant. and Tissue Eng.* 2013. V. 8. № 3. P. 86–94.
10. Psaltis P.J., Peterson K.M., Xu R., et al. // *JACC Cardiovasc Imaging*. 2013. V. 6. № 7. P. 795–802.

**QUALITY ASSESSMENT OF DECELLULARIZATION
AND RECELLULARIZATION OF TISSUE-ENGINEERING CONSTRUCTIONS
BY THE CHEMILUMINESCENCE METHOD**

**E. A. Gubareva, E. V. Kuevda, A. Kh. Kade, I. M. Bykov, I. I. Pavlyuchenko,
T. V. Gaivoronskaya, A. N. Sidorenko, O. V. Tsymbalov, V. G. Ovsyannikov,
V. V. Myasnikova, D. I. Shashkov, S. S. Dzhimak**

Presented by Academician of the RAS V.A. Tkachuk October 3, 2018

Received October 15, 2018

It has been established that indicators of the intensity of chemiluminescence in the native and muscle cellized tissues of rat muscular organs, as well as in their decellularized matrices, can serve as one of the express criteria that allows, along with ultrastructural analysis, to quantify the viability of cell structures in biological samples of the diaphragm.

Keywords: chemiluminescence, extracellular matrix, recellularization, diaphragm, free radicals.

УДК 579.24+544.032.5+57.043

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И МАГНИТНОГО ИЗОТОПА ^{25}Mg НА ОБРАЗОВАНИЕ БИОПЛЁНОК БАКТЕРИЯМИ *E. coli*

У. Г. Летута*, Т. А. Тихонова

Представлено академиком РАН А.Л. Бучаченко 17.09.2018 г.

Поступило 08.10.2018 г.

Установили, что формирование биоплёнок бактериями *E. coli* — магниточувствительный процесс. Совместное влияние магнитного изотопа ^{25}Mg и постоянного магнитного поля диапазона 20–35 мТл стимулировало образование биоплёнок бактериями *E. coli* в отличие от немагнитных изотопов $^{24,26}\text{Mg}$. Магнитно-полевые эффекты в диапазоне 2–10 мТл, зарегистрированные для всех бактерий независимо от магний-изотопного обогащения среды, свидетельствуют о чувствительности внутриклеточных процессов к слабым магнитным полям.

Ключевые слова: магнитная чувствительность, изотопы магния, магнитное поле, *E. coli*, биоплёнки.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846768-771>

Способность живых организмов реагировать на магнитно-полевое воздействие неоднократно доказана экспериментально [1]. Например, для бактерий, включая *E. coli*, была обнаружена интересная корреляция между напряжённостью постоянного магнитного поля и скоростью роста: рост бактериальной культуры подавлялся пропорционально увеличению магнитного поля при 30, 60, 80 и 100 мТл [1].

Для объяснения эффектов магнетизма в биологических системах уже предложено несколько физико-химических механизмов [2–5]. Один из наиболее вероятных — это ферментативные спинзависимые ион-радикальные реакции [3–5]. Впервые они были описаны для процесса ферментного фосфорилирования с участием магнитного изотопа ^{25}Mg [3, 4]. Обнаруженный магнитно-изотопный эффект (МИЭ) при ферментативном синтезе АТФ объясняется магнитным взаимодействием ядра ^{25}Mg с неспаренным электронным спином и индуцированием синглет-триплетной конверсии ион-радикальной пары в активном сайте фосфорилирующего фермента. Когда увеличивается вероятность прямой реакции синтеза АТФ, то соответственно растёт выход продукта. Аналогичные МИЭ были обнаружены при синтезе АТФ для магнитных изотопов цинка ^{67}Zn и кальция ^{43}Ca , а также при синтезе ДНК в экспериментах *in vitro* [3, 4, 6, 7].

Теория биологической магниточувствительности обосновывает чувствительность внутриклеточных процессов к внешнему магнитному полю и к маг-

нитным моментам атомных ядер изотопов [5]. Последовательность внутриклеточных биохимических реакций, при которых имеет место процесс с участием магнитных изотопов, будет приводить к физиологическому ответу организма, доступному для экспериментальной регистрации. Так, добавление магнитного изотопа магния в питательную среду роста бактерий *E. coli* способствовало увеличению скорости роста и колониеобразующей способности [5]. Совместное влияние постоянного магнитного поля и магнитных изотопов магния и цинка позволило нам изменить ростовые и биохимические показатели бактерий *E. coli* [8, 9]. Подобные эффекты открывают новые возможности управления ферментативными процессами и, как следствие, основными физиологическими свойствами бактерий.

Одно из таких свойств, представляющее особый интерес, — это образование биоплёнок. Сообщества микроорганизмов, объединённые в биоплёнки, представляют собой сложную структуру, состоящую из самих микробов и синтезируемого ими полимерного матрикса (белки, полисахариды и нуклеиновые кислоты). Биоплёнки защищают бактерии от воздействия внешних физико-химических факторов: антибиотиков, ультрафиолетового облучения, механического воздействия и т.п. [10]. Удалить и инактивировать развитые и зрелые биоплёнки достаточно трудно [10], что приводит к нежелательным проблемам, особенно в медицине и промышленности. Возможность контроля образования биоплёнок — это междисциплинарная научная задача, изучаемая давно и активно [10]. Обнаружено [11], что у микро-

Оренбургский государственный университет

*E-mail: shevulyana@yandex.ru

организма *Pseudomonas aeruginosa* образование биоплёнок подавляется воздействием переменного магнитного поля.

Цель настоящей работы — исследовать влияние внешнего постоянного магнитного поля и магнитных моментов ядра изотопа магния на процесс образования биоплёнок бактериями *E. coli*.

Использовали культуру клеток *Escherichia coli*, штамм K12TG1. Бактерии *E. coli* выращивали в минимальных синтетических питательных средах М9, отличающихся только изотопной формой содержащегося в сульфате магния — немагнитные ^{24}Mg , ^{26}Mg , магнитный ^{25}Mg и природный изотоп магния (ФГУП “Электрхимприбор”, Россия) [8].

Клетки *E. coli* предварительно инкубировали в бульоне Lb (“Sigma-Aldrich”, США) в течение 7 ч при температуре 37 °С. Затем клетки пересеивали в среды М9, содержащие изотопы ^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg , Mg. Плотность стартовой культуры составила $3 \cdot 10^6$ клеток/мл. Далее образцы в 24-луночных полистироловых планшетах помещали в термостат, находящийся в поле электромагнита. В термостате одновременно создавали области магнитных полей в диапазоне 2–82 мТл с помощью электромагнита производства “Takeda Richen Ltd.” (Япония). Экспериментальная установка подробно описана в работе [8]. Бактерии инкубировали в термостате в течение 48 ч при постоянной температуре 37 °С. Бактерии культивировали одновременно в 96 контрольных точках, соответствующих 15 стационарным магнитным полям. Магнитное поле в этих точках измеряли с помощью миллитесламетра ТП2–2У (“Фела-контроль”, Россия). Контрольные образцы помещали в термостат и инкубировали при 37 °С без дополнительного постоянного магнитного поля.

Способность к биоплёнкообразованию оценивали стандартным фотометрическим методом по степени связывания кристаллического фиолетового [12]. Через 48 ч инкубации в постоянном магнитном поле бульонную культуру осторожно удаляли и вносили в лунки 1,5 мл 0,005%-го водного раствора кристаллического фиолетового для окрашивания сформированных биоплёнок. Окрашивание проводили в течение 60 мин. Далее, полностью удалив из пробирок раствор кристаллического фиолетового, проводили экстракцию красителя из биоплёнки в 1 мл 96%-го этанола в течение 45 мин при комнатной температуре. После этого проводили осаждение остатков биоплёнок и бактерий с помощью центрифугирования в течение 7 мин при 9000 об./мин на центрифуге СМ-50М (“ELMI”, Латвия). Затем образцы вносили в объёме 200 мкл в лунки 96-лу-

ночного планшета. Измерение концентраций кристаллического фиолетового проводили с помощью иммуноферментного анализа (прибор АИФР-01 УНИПЛАН, “Пикон”, Россия, длина волны 530 нм).

Результаты обрабатывали с помощью прикладного программного пакета Origin 8.0 с применением критерия *t* Стьюдента. Различия между средними значениями оптической плотности считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

В результате проведения 10 экспериментальных серий были получены магнитно-полевые зависимости оптической плотности, характеризующие способность к биоплёнкообразованию бактериями *E. coli*, культивируемыми на средах с изотопами магния. Результаты представлены на рис. 2. На рис. 1 приведены данные для контрольных образцов.

Бактерии *E. coli*, культивируемые без внешнего постоянного магнитного поля, образовывали биоплёнки лучше при культивировании на среде с магнитным изотопом ^{25}Mg , чем при таковом с немагнитными формами $^{24,26}\text{Mg}$ (рис. 2). Величина МИЭ магния составила 7–8% и достоверно отличалась от контроля. Подобные закономерности были обнаружены нами ранее [8] при исследовании скорости роста бактерий *E. coli*, обогащённых магнитным изотопом магния.

Анализ полученной магнитно-полевой зависимости оптической плотности позволил выделить два диапазона магнитных полей, в которых происходили значимые изменения формирования биоплёнок микроорганизмами: 2–10 и 20–35 мТл (рис. 1). В первом диапазоне мы наблюдали выраженные изменения оптической плотности — увеличение или

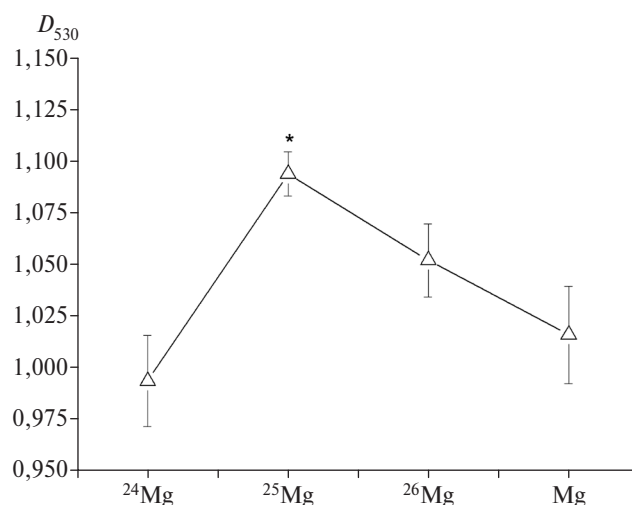


Рис. 1. Формирование биоплёнок бактериями *E. coli*, культивируемых на средах М9 с изотопами ^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg , Mg. Здесь и на рис. 2 $M \pm m$, $n = 10$, $*p < 0,05$ при сравнении с контролем.

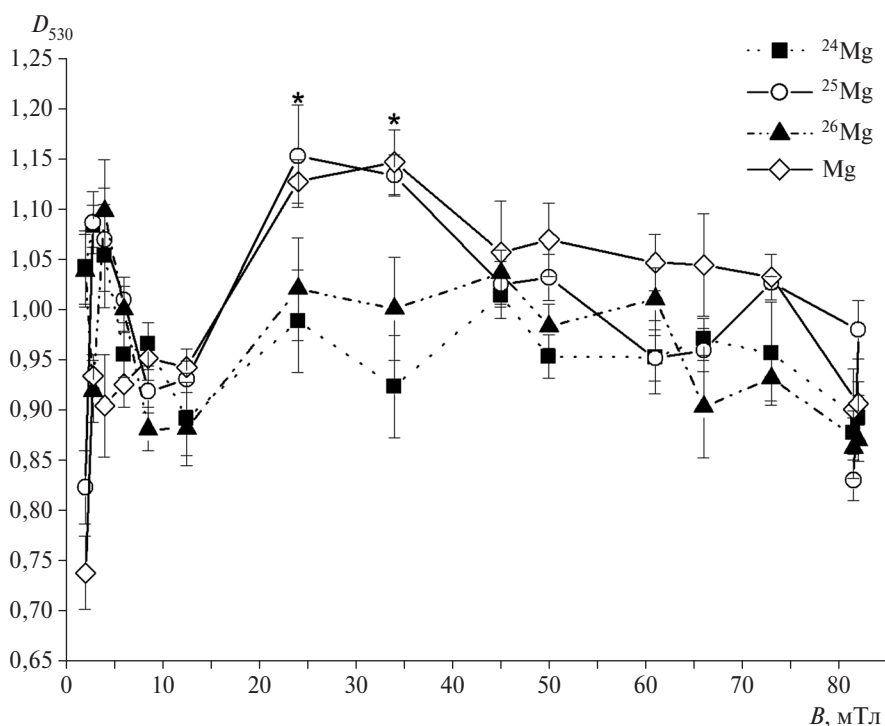


Рис. 2. Зависимость от величины магнитного поля процесса формирования биоплёнок бактериями *E. coli*, культивируемых на средах М9 с изотопами ^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg , Mg.

уменьшение. Это свидетельствовало о чувствительности процесса биоплёнкообразования к слабым постоянным магнитным полям независимо от типа изотопа магния, находившегося в питательной среде роста. Обнаружение магнитно-полевых эффектов именно в этом диапазоне было ранее предсказано теоретически [5]. Этот диапазон является оптимальным для регистрации физиологического отклика живых организмов в ответ на действие магнитных полей. Значения констант сверхтонкого взаимодействия органических радикалов, содержащих стабильные магнитные изотопы, всегда присутствующие в клетках, например ^{13}C , ^{31}P , ^1H , лежат в диапазоне 0,1–10 мТл [13]. Внутриклеточная концентрация таких магнитных изотопов примерно одинакова для всех бактериальных культур ввиду идентичности условий роста. Поэтому наблюдаемые изменения образования плёнок бактериями в диапазоне 2–10 мТл не зависят от изотопа магния, содержащегося в питательной среде.

В диапазоне 20–35 мТл происходило незначительное повышение оптической плотности для двух исследуемых групп — бактерий, культивируемых в присутствии магнитного изотопа ^{25}Mg и природного магния (содержащего 10% магнитного магния). В этих условиях микроорганизмы лучше формировали биоплёнки. Совместное влияние магнитного

поля этого диапазона и магнитных моментов атомных ядер на ростовые показатели бактерий *E. coli* было также нами обнаружено для стабильного магнитного изотопа цинка ^{67}Zn [9]. В цитируемой работе мы наблюдали увеличение скорости роста бактерий и колониеобразующей способности. Обнаруженные тогда магнитно-полевые и магнитно-изотопные эффекты цинка не были связаны с процессами ферментативного синтеза АТФ [8]. С большой вероятностью можно сказать, что магнитные поля 20–35 мТл и магнитные моменты ядер ^{25}Mg влияют на процессы ферментативного синтеза белка, а также репликации ДНК [14]. Естественным образом это приводит к стимуляции биоплёнкообразования бактериями *E. coli*, так как синтезируемый бактериями внеклеточный матрикс состоит в основном из белков и полисахаридов [10]. При дальнейшем увеличении постоянного магнитного поля до 80 мТл происходит незначительное подавление образования плёнок микроорганизмами всех исследуемых групп.

Итак, процесс формирования биоплёнок бактериями *E. coli* является магниточувствительным. Обнаруженное влияние внешнего постоянного магнитного поля и магнитного изотопа ^{25}Mg на процесс биоплёнкообразования согласуется с теорией магниточувствительности живых организмов [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Albuquerque W.W., Costa R.M., Fernandes Tde S., Porto A.L.* // Prog. Biophys. Mol. Biol. 2016. № 121. P. 16–28.
2. *Binhi V.N.* Magnetobiology Underlying Physical Problems. Tokyo: Acad. Press, 2009. P. 473.
3. *Buchachenko A.* // Bioelectromagnetics. 2016. V. 37. P. 1–13.
4. *Buchachenko A.* Magneto-Biology and Medicine. N.Y.: Nova Sci. Publ., 2014. 144 p.
5. *Letuta U.G., Berdinskiy V.L., Udagawa Ch., Tanimoto Y.* // Bioelectromagnetics. 2017. V. 38. № 7. P. 511–521.
6. *Buchachenko A.L., Chekhonin V.P., Orlov A.P., Kuznetsov D.A.* // Int. J. Mol. Med. Adv. Sci. 2010. V. 6. P. 34–37.
7. *Buchachenko A.L., Orlov A.P., Kuznetsov D.A., Bre-slavskaya N.N.* // Nucl. Acids Res. 2013. V. 41. P. 8300–8307.
8. *Letuta U.G., Berdinskiy V.L.* // Bioelectromagnetics. 2017. V. 38. № 8. P. 581–591.
9. *Летута У.Г., Шайлина Д.М.* // ДАН. 2018. Т. 479. № 5. С. 585–588.
10. *Zhou G., Li L., Shi Q., Ouyang Y., Chen Y., Hu Can W.* // J. Microbiol. 2014. V. 60. P. 5–14.
11. *Bandaraa H.M.H.N., Nguyena D., Mogaralaa S., Osiñskib M., Smyth H.D.C.* // Biofouling. 2015. V. 31. № 5. P. 443–457.
12. *Merritt J.H., Kadouri D.E., O'Toole G.A.* // Curr. Protoc. Microbiol. 2005. № 1.
13. *Бучаченко А.Л., Вассерман А.М.* Стабильные радикалы. Электронное строение, реакционная способность и применение. М.: Химия, 1973. 408 с.
14. *Baltaci A.K., Yuce K., Mogulkoc R.* // Biol. Trace Elem. Res. 2017. V. 183. № 1. P. 22–31.

MAGNETIC FIELDS AND MAGNETIC ISOTOPE ^{25}Mg EFFECTS ON BIOFILMS FORMATION BY BACTERIA *E. coli*

U. G. Letuta, T. A. Tikhonova

Presented by Academician of the RAS A.L. Buchachenko September 17, 2018

Received October 8, 2018

The biofilm formation by bacteria *E. coli* is a magnetosensitive process. The combined effects of a magnetic magnesium isotope ^{25}Mg and a static magnetic field in the range of 20–35 mT stimulate biofilm formation by bacteria *E. coli* compared to non-magnetic magnesium isotopes $^{24,26}\text{Mg}$. Magnetic field effects in the range of 2–10 mT, registered for all bacteria regardless of magnesium-isotope enrichment of nutrient medium, indicate the sensitivity of intracellular processes to weak magnetic fields.

Keywords: magnetic sensitivity, magnesium isotopes, magnetic field, *E. coli*, biofilms.

УДК 577.29

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РОЛИ КОИЛИНА
В УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ *Solanum tuberosum*
К ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ И АБИОТИЧЕСКИМ СТРЕССАМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ РЕДАКТИРОВАНИЯ CRISPR/Cas9**

**А. В. Махотенко^{1,2}, А. В. Хромов^{1,2}, Е. А. Снигирь¹,
С. С. Макарова^{1,2}, В. В. Макаров¹, Т. П. Супрунова¹,
Н. О. Калинина^{1,2,*}, М. Э. Тальянский^{1,3}**

Представлено академиком РАН Л.П. Овчинниковым 21.08.2018 г.

Поступило 11.10.2018 г.

С использованием технологии CRISPR/Cas9 исследовали роль ядерного белка коилина в механизмах устойчивости растений картофеля *Solanum tuberosum* сорта Чикаго к биотическому и абиотическим стрессам. Для редактирования гена коилина комплекс эндонуклеаза Cas9—короткая гидовая РНК иммобилизовали на микрочастицах золота или хитозана и доставляли в клетки апикальной меристемы методами биобаллистики или вакуумной инфильтрации соответственно. Редактирование по крайней мере одного аллеля гена коилина привело к выраженному увеличению резистентности отредактированных линий к заражению вирусом картофеля Y и повышению устойчивости к солевому и осмотическому стрессам.

Ключевые слова: картофель, геномное редактирование, CRISPR/Cas9, ген коилина, вирусная инфекция, солевой стресс, устойчивость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846772-776>

Коилин — главный структурный белок, контролирующий формирование, состав и активность субъядерных телец Кахалы (ТК), физически и функционально ассоциированных с ядрышками. Тельца Кахалы участвуют в метаболизме РНК и сборке разнообразных рибонуклеопротеидных (РНП) комплексов, включая созревание некоторых ядерных РНК и сборку, модификацию и транспорт РНП-частиц разных классов. Растущее число данных свидетельствует о том, что ядрышки и ТК также принимают участие во многих других важных клеточных функциях, таких как клеточная пролиферация, метаболизм РНК, реакция на стрессовые воздействия и др. [1–3]. Ранее [4], используя модельную систему растений *Nicotiana*, мы показали, что коилин и ТК также влияют на взаимодействие между растениями-хозяевами и вирусами. Трансгенные растения, в которых экспрессия гена коилина была подавлена

с помощью механизма РНК-интерференции, отвечали по-разному на заражение вирусами, принадлежащими к разным таксономическим группам. Так, в отсутствие коилина мы наблюдали значительное угнетение процесса инфицирования растений картофеля РНК-содержащим потивиром картофеля Y (YBK), одним из наиболее опасных, экономически важных патогенов картофеля [4]. Кроме того, в работе [3] было показано, что коилин участвует в реакции растения на абиотический солевой стресс. Механизмы участия коилина в защитной реакции на стресс разной природы остаются до конца невыясненными. Этот аспект функций коилина составил предмет настоящего исследования.

В нашей работе мы редактировали ген коилина в тетраплоидных растениях картофеля *Solanum tuberosum* сорта Чикаго, используя технологию CRISPR/Cas9, и оценили устойчивость полученных линий с модифицированным геном к заражению YBK и абиотическому стрессу.

Коилины и коилин-подобные белки растений не имеют строгой эволюционной консервативности в аминокислотной последовательности, однако структура их молекул, видимо, построена на основе общих принципов [5]. Молекула коилина у араби-

¹ООО “Дока — Генные Технологии”,

с. Рогачёво Московской обл.

²Московский государственный университет

им. М.В. Ломоносова

³Институт биоорганической химии

им. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова

Российской Академии наук, Москва

*E-mail: kalinina@genebee.msu.ru

дописиса состоит из трёх основных доменов: N-концевого глобулярного домена; центрального, высоко неупорядоченного домена и C-концевого домена (CTD), включающего предполагаемую Тюдор-подобную структуру и неупорядоченный C-конец [5]. Для редактирования мы выбрали участок гена коилина картофеля, кодирующий CTD. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что этот домен вовлечён во взаимодействия с белками клетки, важными для функции ТК [6, 7]. В экспериментах использовали короткую гидовую РНК (кгРНК), комплементарную данной последовательности гена. Синтез *in vitro* и анализ активности кгРНК описаны нами ранее [8]. Рекомбинантную эндонуклеазу Cas9 и синтезированную *in vitro* кгРНК смешивали в реакционном буфере и инкубировали в течение 15 мин при 25 °С для формирования РНП-комплекса. Для геномного редактирования использовали апикальные зоны делящихся клеток, выделенные из верхушечных и боковых побегов картофеля сорта Чикаго, размером около 100–200 мкм. Меристемы переносили в чашки Петри на поверхность питательной среды Мурасиге—Скуга (МС) без добавления гормонов и подвергали или биобаллистике золотыми микрочастицами (0,6 мкм), или инфильтрации микрочастицами хитозана (0,6–0,8 мкм) с сорбированными на них РНП-комплексами Cas9/кгРНК. Затем меристемы переносили в чашки Петри с питательной средой МС уже с добавлением фитогормонов и инкубировали в световом модуле в контролируемых условиях в течение 4–5 нед. По окончании инкубации исследовали ДНК регенерированных растений методом фрагментного анализа. Клетки линий, идентифицированные как мутантные, далее генотипировали. Из растений отобранных линий выделяли суммарный препарат ДНК, затем фрагмент целевой последовательности гена коилина размером 150 нуклеотидов амплифицировали, клонировали в ТА-вектор и трансформировали в *E. coli*. Для контрольной и каждой из редактированных линий получали не менее 30 колоний, из них выделяли плазмидную ДНК, которую затем секвенировали.

На рис. 1 представлены результаты анализа контрольных растений картофеля и растений двух редактированных линий, обозначенных как D15 и F25. В контрольных растениях мы обнаружили два аллеля (A1 и A2), отличающихся по своему нуклеотидному составу. Мы предполагаем, что вероятным объяснением этого результата является то, что два других аллеля идентичны по данному участку выявленным. Редактированные линии содержали делеции длиной

Контроль		
5'...	GCTCTATTATAATGAAGACGGAATCTCTGGAGGTACCTTC ... 3'	A1
5'...	GCTCTATTATAATGACGATGGAATCTCCGAGGTACCTTC ... 3'	A2
D15		
5'...	-----CTCTGGAGGTACCTTC ... 3'	A1
5'...	GCTCTATTATAATGACGATGGAATCTCCGAGGTACCTTC ... 3'	A2
F25		
5'...	GCTCTATTATAATGAAGACGGAATCTCTGGAGGTACCTTC ... 3'	A1
5'...	-----CTCCGAGGTACCTTC ... 3'	A2

Рис. 1. Генотипирование целевого фрагмента гена коилина контрольного растения *Solanum tuberosum* сорта Чикаго и редактированных линий. Представлены последовательности аллелей в целевом фрагменте гена коилина контрольного растения (выявленные аллели отмечены как A1 и A2, полужирным шрифтом выделены нуклеотидные замены, характерные для этих аллелей) и редактированных линий D15 и F25. Последовательность целевого сайта, которой комплементарна кгРНК, выделена подчёркиванием. Сайт РАМ (protospacer associated motif) обозначен курсивом. Отсутствующие в редактированных линиях последовательности аллелей (делетированные нуклеотиды) изображены пунктирной линией.

более 60 нуклеотидов, но в разных аллелях (в аллеле A1 — для линии D15, полученной с использованием метода бомбардировки золотыми микрочастицами (БЗМ), и в аллеле A2 — для линии F25, полученной инфильтрацией комплекса Cas9/кгРНК). Вероятно, что протяжённые нуклеотидные последовательности в аллеле A1 линии D15 и в аллеле A2 линии F25 делетированы в составе фрагмента, связывающего кгРНК, вследствие чего они не амплифицируются при проведении ПЦР. Протяжённые делеции (до 600 п.н.) описаны ранее при редактировании системой CRISPR/Cas9 генома мыши [9].

Устойчивость редактированных линий картофеля к заражению YBK-O (штамм обыкновенный) изучали в двух сериях экспериментов. В первой серии пробирочные растения-регенеранты контрольной и редактированных линий F25 и D15 (по 10–20 растений в каждой группе) заражали YBK-O и через 28 дней после инокуляции из растений выделяли суммарный препарат РНК для дальнейшего анализа. Во второй серии опытов взрослые растения картофеля (контрольные линии и линии F25 и D15) на стадии 5–6 листьев (10 растений в каждой группе) заражали YBK-O и через 28 дней после инокуляции из системных симптоматических листьев каждого растения выделяли суммарный препарат РНК. Вирусную РНК определяли полуколичественным методом ПЦР с обратной транскрипцией. В качестве гена сравнения использовали ген рибосомного белка L23. Мы выявили (рис. 2а) значительное уменьшение доли заражённых вирусом растений в редактированных

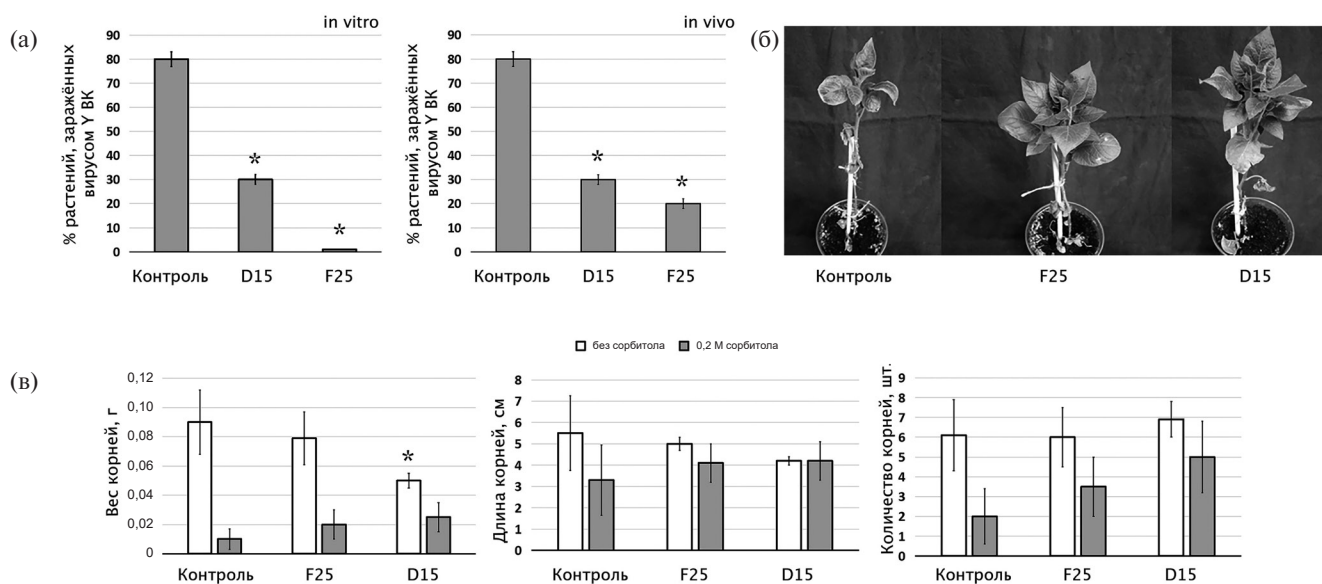


Рис. 2. Характеристика устойчивости линий, редактированных по гену коилина, к биотическому стрессу (вирусной инфекции) и абиотическим (солевому и осмотическому) стрессам: а — доля (в процентах от общего числа заражённых YBK-O растений) контрольных растений и растений редактированных линий, в которых была выявлена вирусная инфекция; б — влияние солевого стресса на фенотип контрольных растений и редактированных линий через 18 дней после обработки растений раствором 300 мМ NaCl; в — влияние осмотического стресса на рост и развитие корневой системы пробирочных растений контрольной и редактированных линий через 14 дней роста на среде, содержащей 0,2 М сорбитола. На графиках (а) и (в) — итоговые результаты трёх независимых экспериментов, $M \pm SD$, $n = 10$ для каждой группы, $*p < 0,05$ по критерию t Стьюдента по сравнению с контролем.

линиях по сравнению с контрольными растениями в обеих сериях экспериментов. Так, по сравнению с контрольными растениями резистентность линии D15 была выше в 2,7 и 2 раза, а линии F25 — в 10 и 4 раза в опытах in vitro и in vivo соответственно.

Далее мы исследовали устойчивость редактированных линий к двум типам абиотического стресса — солевому и осмотическому. Для изучения фенотипического проявления эффекта солевого стресса взрослые растения картофеля контрольной и редактированных линий F25 и D15, выращенные до стадии 5–6 листьев в горшках с объёмом почвы около 0,4 л, поливали ежедневно 50 мл раствора 300 мМ NaCl в течение 18 дней. Ответ на солевой стресс оценивали визуально по числу листьев с хлорозами и пониженным тургором, а также по размеру листовой пластинки. Видимые различия между группами контрольных растений и редактированных линий проявились на 11-й день опыта: в условиях солевого стресса у контрольных растений наблюдали ускоренное пожелтение и опадание листьев по сравнению с редактированными линиями. Дополнительно обнаружили заметное ингибирование развития и деформацию листовой пластинки (данные не представлены). Через 18 дней симптомы развития стресса усилились. Однако различия в устойчивости к стрессу между контрольными рас-

тениями и редактированными линиями сохранились (рис. 2б).

Влияние гиперосмотического стресса изучали у пробирочных растений контрольной линии и редактированных линий F25 и D15. С этой целью растения каждой группы выращивали на среде МС, не содержащей сорбитола или содержащей 0,2 М сорбитола, в течение 14 дней в одинаковых условиях температуры и освещённости. Оценивали следующие параметры: сырой вес целого растения, надземного побега и корня, а также длину и общее число корней. Между контрольными растениями и редактированными линиями мы не зафиксировали заметного различия по весу надземного побега, однако суммарный вес корней отличался у контрольных и редактированных растений (рис. 2в). Присутствие в среде сорбитола угнетало развитие корневой системы приблизительно в 9 раз в контроле и соответственно в 4 и 2 раза у редактированных линий F25 и D15. Сорбитол практически не влиял на длину корней у редактированных линий, тогда как у контрольных растений этот показатель уменьшился почти в 2 раза. Число корней в присутствии сорбитола уменьшилось у контрольных растений в 3 раза, у растений линии F25 — в 2 раза, а у линии D15 — в 1,4 раза (рис. 2в). В целом большая устойчивость к осмотическому стрессу у ре-

дактированных по гену коилина линий, видимо, обусловлена более эффективным развитием корневой системы.

Итак, в настоящей работе для редактирования генома картофеля мы использовали клетки апикальной меристемы, преимущество которых является простота их регенерации в целые растения, занимающей около двух месяцев, что широко используется в производстве безвирусного картофеля. Для доставки РНП-комплекса CRISPR/Cas9 (бесплазмидный способ доставки) в клетки применили достаточно широко используемый метод БЗМ клеток РНП-комплексами [10, 11] и новый метод инфильтрации РНП-комплексов, иммобилизованных на микрочастицах хитозана. Генетический анализ показал, что нам удалось отредактировать по крайней мере один аллель гена коилина. Мы не обнаружили одиночных инделей (инсерции/делеции), которые ранее были описаны при бесплазмидной доставке РНП-комплекса CRISPR/Cas9 в протопласты картофеля [12, 13]. В нашем случае отсутствовала последовательность по крайней мере одного аллеля при секвенировании фрагмента целевого гена в области, фланкирующей место связывания кРНК. Протяжённые делеции (до 600 п.н.) были описаны ранее при редактировании системой CRISPR/Cas9 зигот мыши [9]. Наши данные согласуются с этим наблюдением, поскольку клетки апикальной меристемы являются низкодифференцированными, быстро делящимися клетками.

Несмотря на то что нам не удалось полностью исключить экспрессию гена коилина, редактирование последовательности по крайней мере одного из аллелей, кодирующих домен CTD коилина, сопровождалось заметным увеличением резистентности растений картофеля к заражению УБК и появлением устойчивости к солевому и осмотическому стрессам.

Таким образом, используя технологию CRISPR/Cas9 и бесплазмидный способ доставки редактирующего РНП-комплекса в клетки растения, мы показали, что коилин картофеля вовлечён в защитный ответ растения на биотический и абиотический

стрессы. Эти результаты позволяют предполагать, что ген коилина является перспективной мишенью для практического использования в картофелеводстве.

А.В. Махотенко и А.В. Хромов внесли равный вклад в настоящую работу.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 16–16–04019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bassett C.L. // Crit. Rev. Plant Sci. 2012. V. 31. P. 258–270.
2. Boulon S., Westman B.J., Hutten S., Boisvert F.M., Lamond A.I. // Mol. Cell. 2010. V. 40. № 2. P. 216–227.
3. Love A., Yu Ch., Petuchova N., Kalinina N.O., Chen J., Taliansky M.E. // RNA Biol. 2017. V. 14. № 6. P. 779–790.
4. Shaw J., Love A., Makarova S., Kalinina N.O., Harrison B.D., Taliansky M.E. // Nucleus. 2014. V. 5. P. 85–94.
5. Makarov V., Rakitina D., Protopopova A., Yaminsky I., Arutiunian A., Love A.J., Taliansky M., Kalinina N. // PLoS One. 2013. V. 8. № 1. e53571.
6. Xu H., Pillai R.S., Azzouz T.N., Shpargel K.B., Kambach C., Hebert M.D., Schümperli D., Matera A.G. // Chromosoma. 2005. V. 114. P. 155–166.
7. Toyota C.G., Davis M.D., Cosman A.M., Hebert M.D. // Chromosoma. 2010. V. 119. P. 205–215.
8. Хромов А.В., Гущин В.А., Тимербаев В.И., Калинина Н.О., Тальянский М.Э., Макаров В.В. // ДАН. 2018. Т. 479. № 3. С. 343–347.
9. Shin H.Y., Wang C., Lee H.K., Yoo K.H., Zeng X., Kuhns T., Yang C.M., Mohr T., Liu C., Hennighausen L. // Nat. Commun. 2016. V. 8. 15464.
10. Martin-Ortigosa S., Wang K. // Transgenic Res. 2014. V. 23. P. 743–756.
11. Kanchiswamy C.N. // Plant Cell Rept. 2016. V. 35. P. 1469–1474.
12. Andersson M., Turesson H., Olsson N., Fält A.S., Ohlsson P., Gonzalez M.N., Samuelsson M., Hofvander P. // Physiol. Plantarum. 2018. V. 164. P. 378–384.
13. Andersson M., Turesson H., Nicolai A., Fält A.S., Samuelsson M., Hofvander P. // Plant Cell Repts. 2016. V. 36. P. 117–128.

**FUNCTIONAL ANALYSIS OF COILIN IN VIRUS RESISTANCE
AND STRESS TOLERANCE OF POTATO *Solanum tuberosum*
USING CRISPR/Cas9 EDITING**

**A. V. Makhotenko, A. V. Khromov, E. A. Snigir, S. S. Makarova,
V. V. Makarov, T. P. Suprunova, N. O. Kalinina, M. E. Taliansky**

Presented by Academician of the RAS L.P. Ovchinnikov August 21, 2018

Received October 11, 2018

The role of the nuclear protein coilin in the mechanisms of resistance of potato *Solanum tuberosum* cultivar Chicago to biotic and abiotic stresses was studied using the CRISPR/Cas9 technology. For the coilin gene editing, a complex consisting of the Cas9 endonuclease and a short guide RNA was immobilized on gold or chitosan microparticles and delivered into apical meristem cells by bioballistics or vacuum infiltration methods, respectively. Editing at least one allele of the coilin gene considerably increased the resistance of the edited lines to infection with the potato virus Y and their tolerance to salt and osmotic stress.

Keywords: potato, genome editing, CRISPR/Cas9, coilin gene, virus infection, salt stress, resistance.

УДК 577.29.571.27.576.53

БЕЛОК ВРОЖДЁННОГО ИММУНИТЕТА Tag7 ПОСЛЕ ИНКУБАЦИИ С ЛИМФОЦИТАМИ СТИМУЛИРУЕТ ПОЯВЛЕНИЕ ЦИТОТОКСИЧЕСКИХ НК-КЛЕТОК

Т. Н. Шарапова*, Е. А. Романова, Л. П. Сашенко,
член-корреспондент РАН Н. В. Гнучев, Д. В. Яшин

Поступило 10.09.2018 г.

Tag7 (PGRP-S) — белок врождённого иммунитета, который принимает участие в антибактериальной и противоопухолевой защите, а также стимулирует созревание цитотоксических субпопуляций лимфоцитов. Обнаружили, что инкубация в течение 3 сут лимфоцитов с Tag7 способствует появлению цитотоксических НК-клеток, активных против ряда опухолевых клеточных линий.

Ключевые слова: лимфоциты, цитокины, НК-клетки.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846777-780>

Естественные клетки-киллеры (НК-клетки) — клетки врождённого иммунитета, способные элиминировать клетки с изменённой антигенной детерминантой главного комплекса гистосовместимости (МНС), в частности опухолевые клетки и клетки, инфицированные вирусом [1, 2]. Изменение структуры МНС может происходить вследствие инфекции, опухолевой трансформации или влияния иных факторов [1].

На поверхности НК-клеток экспрессируется широкий спектр активирующих и ингибирующих рецепторов, которые взаимодействуют с клеткой-мишенью. В зависимости от баланса сигналов, поступающих от рецепторов, определяется программа действия НК-клеток: если преобладает сигнал от активирующего рецептора, то запускается программа лизиса клетки-мишени [3].

На своей поверхности НК-клетки экспрессируют несколько видов ингибирующих рецепторов. В норме они распознают антигены МНС класса I (присутствуют на поверхности всех клеток организма) [4, 5].

Цитотоксическая функция НК-клеток прежде всего связана с активирующими рецепторами, которые способны распознавать специфические лиганды на поверхности вирусинфицированных или трансформированных клеток. Наиболее изученный активирующий рецептор — NKG2D, который распознаёт неклассический антиген МНС — MicA. В результате трансформации или проникновения

вируса в клетке может происходить экспрессия стрессовых молекул, таких как MicA, MicB, ULBP1–6 (неканонические антигены МНС), Hsp70, и снижаться экспрессия собственного комплекса МНС I. В этом случае сигнал от активирующего рецептора, например NKG2D, будет преобладать над тем, который идёт от связывания ингибирующего рецептора с МНС, и мишень будет ликвидирована НК-клеткой. Уменьшение экспрессии антигенов МНС класса I позволяет клетке избежать контакта с лимфоцитами CD8⁺, но не избавляет от взаимодействия с НК-клетками [6–8].

Белок Tag7 — консервативный белок врождённого иммунитета, представлен у насекомых, моллюсков и позвоночных. Достоверно изучена его роль в антибактериальной защите у насекомых. В ИБГ РАН, где он впервые был обнаружен, изучали роль Tag7 в противоопухолевом иммунитете [9]. Было показано [10], что Tag7 образует с Hsp70 комплекс, обладающий цитотоксическим действием на клетки широкого спектра опухолевых клеточных линий. Молекула Tag7 способна активировать цитотоксические субпопуляции лимфоцитов при инкубации в течение 6 сут с мононуклеарными клетками периферической крови (РВМС) здоровых доноров [11].

Цель работы — определить влияние Tag7 на реализацию цитотоксической функции НК-клеток против опухолевых клеток.

Использовали РВМС, выделенные из лейкоцитарной массы здоровых доноров последовательным центрифугированием в градиенте концентрации Ficoll-Paque PLUS (“GE Healthcare”, Швеция) [12]. Процедура получения и очистки Tag7 описана нами

Институт биологии гена

Российской Академии наук, Москва

**E-mail: sharapovatat.nik@gmail.com*

ранее [10]. Конечная концентрация белка в PBMC не превышала 10^{-9} М, NK-клетки активировали рекомбинантным IL-2 (“Sigma-Aldrich”, США, 1000 ед./мл). В качестве клеток-мишеней мы использовали клетки фибробластомы человека линии K562. Лимфоциты и клетки-мишени в отношении 20 : 1 инкубировали в среде RPMI 1640 (Gibco®, “ThermoFisher Scientific”, США), содержащей 10% фетальной телячьей сыворотки (“Invitrogen”, США), в 5% CO₂ и при температуре 37 °С. Для измерения цитотоксической активности в течение 3 ч в среде без сыворотки использовали метод определения жизнеспособных клеток CytoTox-ONE™ (“Promega”, США). Для блокирования цитотоксической активности использовали антитела против гранзима В (“Santa Cruz”, США), которые добавляли к опухолевым клеткам за час до инкубации с лимфоцитами. Для оценки уровня экспрессии цитокинов использовали набор для проведения иммуноферментного анализа (ИФА) компании “Invitrogen” (США). Выделение чистых субпопуляций лимфоцитов проводили с помощью магнитной сепарации частицами Dynabeads (“Invitrogen”) согласно протоколу производителя. Результаты проточной цитометрии получали с помощью прибора Cytomics FC500 MPL с использованием конъюгированных антител CD16-FITC, CD56-PE (“Beckman Coulter”, США).

Через 3 сут инкубации Tag7 с PBMC мы не обнаружили субпопуляцию цитотоксических лимфоцитов, способную убивать клетки K562 (рис. 1). Секреция перфоринов и гранзимов — один из самых распространённых способов убийства опухолевых клеток, характерный для NK-клеток и Т-киллеров CD8⁺. Специфические антитела против гранзима В

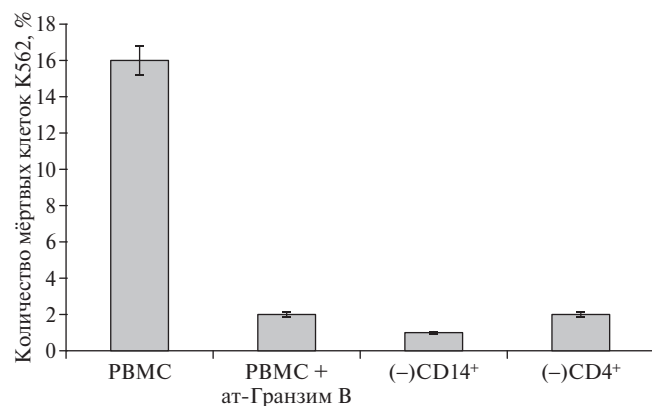


Рис. 1. Цитотоксическая активность PBMC, активированных Tag7, через 3 сут после 3 ч инкубации с клетками K562 с применением антител против гранзима В и в отсутствие (–) субпопуляции моноцитов CD14⁺ и Т-хелперов CD4⁺. Здесь и на рис. 2–4 $M \pm m$, $n = 4$ для каждой группы.

практически полностью блокировали цитотоксическую активность (рис. 1). Логично предположить, что после инкубации Tag7 с PBMC через 3 сут должны появиться в инкубационной среде NK-клетки или Т-киллеры. Наши предварительные исследования показали, что активированные Tag7 Т-лимфоциты убивают опухолевые клетки без использования гранзимов [11]. Поэтому мы предположили, что вся цитотоксическая активность через 3 сут реализуется NK-клетками. С помощью метода проточной цитометрии мы подтвердили это предположение: количество NK-клеток достигло максимума через 3 дня после добавления Tag7 (рис. 2).

Далее мы предположили, что для активации цитотоксической функции NK-клеток необходимо участие моноцитов. Ранее мы показали [11], что на поверхности моноцитов экспрессирован рецептор TREM-1, с которым связывается Tag7. Используя метод магнитной сепарации, мы выделили пул моноцитов из инкубационной среды и активировали оставшиеся лимфоциты Tag7. После этой процедуры мы не зарегистрировали проявления цитотоксической активности (рис. 1), следовательно, моноциты участвуют в реализации цитотоксической функции NK-клеток.

Известно, что для активации NK-клеток не требуется презентация антигена, поэтому мы предположили, что ключевая роль в развитии их цитотоксичности принадлежит цитокинам. Одним из ключевых факторов созревания NK-клеток является определённый спектр цитокинов, главный из которых — IL-2 [13]. Для проверки этой гипотезы с помощью ИФА мы измерили уровень секреции цитокина IL-2 в течение 3 сут после добавления Tag7 и обнаружили, что его количество выросло через 3 сут (рис. 3). Основным источником IL-2 являются Т-хелперы или лимфоциты CD4⁺, которые выделяют его как фактор созревания цитотоксических Т-клеток, а также для ауторегуляции собственных

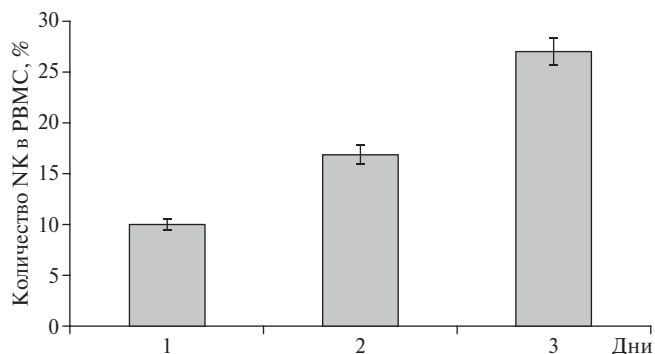


Рис. 2. Динамика содержания субпопуляции NK-клеток в течение 3 сут в PBMC, активированных Tag7.

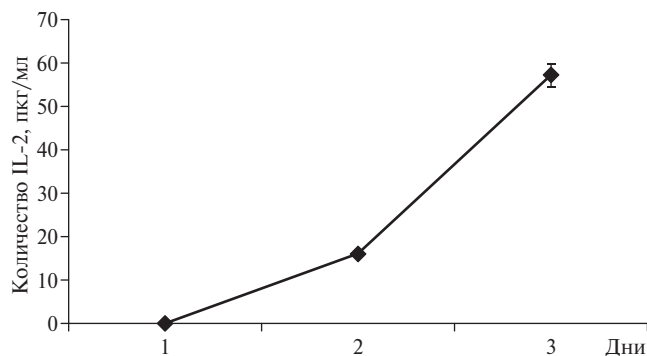


Рис. 3. Уровень секреции IL-2 в течение 3 сут после добавления Tag7.

функций. Чтобы установить участие лимфоцитов CD4⁺ в созревании NK-клеток и реализации их цитотоксической функции, с помощью магнитной сепарации мы удалили популяцию лимфоцитов CD4⁺ из инкубационной среды и активировали оставшиеся лимфоциты белком Tag7. После этих манипуляций мы не наблюдали никакой цитотоксической активности (рис. 1). По-видимому, моноциты принимают участие в инициации процессов выработки цитокинов и играют роль посредника в активации лимфоцитов CD4⁺.

Чтобы достоверно определить роль IL-2 в развитии цитотоксичности NK-клеток, эти клетки выделяли методом магнитной сепарации, инкубировали в течение 3 сут с рекомбинантным IL-2 и оценивали способность индуцировать гибель клеток-мишеней (рис. 4). Цитотоксическая активность активированных IL-2 NK-клеток достигла 75% от классической активности РВМС через 3 сут, и в отсутствие активатора мы её не зафиксировали.

Таким образом, мы смогли определить ключевые моменты активации цитотоксической функции NK-клеток. При добавлении Tag7 к РВМС происходит активация моноцитов и, как следствие, лимфоцитов CD4⁺, которые начинают секретировать IL-2, который стал ключевым цитокином, участвующим в реализации цитотоксической функции NK-клеток. Уровень цитокина вырос уже через 2 сут и достиг максимума через 3 сут. Увеличение секреции IL-2 коррелировало с ростом процентного содержания NK-клеток в РВМС в течение 3 дней. Наличие цитокинов в среде, по-видимому, стимулировало созревание цитотоксических NK-клеток. Активированные Tag7 лимфоциты через 3 сут были

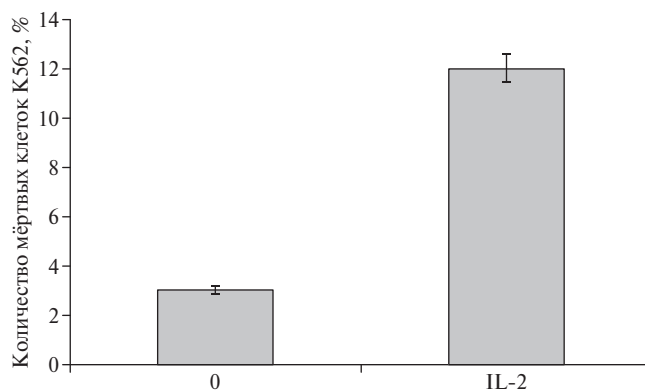


Рис. 4. Цитотоксическая активность NK-клеток в присутствии IL-2.

способны индуцировать клеточную смерть в опухолевых клетках. Таким образом, мы подтвердили участие Tag7 в созревании цитотоксических субпопуляций NK-клеток.

Источник финансирования. Работа была поддержана грантом РНФ 15–14–00031–П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fröh K., Gruhler A., Krishna R.M., et al. // Immunol. Rev. 1999. V. 168. P. 157–166.
2. Sun J.C., Lanier L.L. // Nature Revs. Immunol. 2011. V. 11. № 10. P. 645–657.
3. Martinet L., Smyth M.J. // Nature Revs. Immunol. 2015. V. 15. № 4. P. 243–254.
4. Arnon T.I., Markel G., Mandelboim O. // Seminars in Cancer Biol. 2006. V. 16. № 5. P. 348–358.
5. Gunturi A., Berg R.E., Forman J. // Immunol. Res. 2004. V. 30. № 1. P. 29–34.
6. González S., López-Soto A., Suarez-Alvarez B., et al. // Trends Immunol. 2008. V. 29. № 8. P. 397–403.
7. Gehrmann M., Liebisch G., Schmitz G., et al. // PLoS One. 2008. V. 3. № 4. P. e1925.
8. Diefenbach A., Raulet D.H. // Immunol. Revs. 2001. V. 181. № 1. P. 170–184.
9. Кустикова О.С., Киселев С.Л., Бородулина О.П. и др. // Генетика. 1996. Т. 32. № 5. С. 621–628.
10. Sashchenko L.P., Dukhanina E.A., Yashin D.V., et al. // J. Biol. Chem. 2004. V. 279. № 3. P. 2117–2124.
11. Sharapova T.N., Ivanova O.K., Soshnikova N.V., et al. // J. Innate Immunol. 2017. V. 9. P. 598–608.
12. Sashchenko L.P., Gnuchev N.V., Lukjanova T.I., et al. // Immunol. Lett. 1993. V. 37. № 2–3. P. 153–157.
13. Gasteiger G., Hemmers S., Firth M.A., et al. // J. Exp. Med. 2013. V. 210. № 6. P. 1167–1178.

**INNATE IMMUNE PROTEIN Tag7 STIMULATES
THE APPEARANCE OF CYTOTOXIC NK CELLS AFTER INCUBATION
WITH LYMPHOCYTES**

**T. N. Sharapova, E. A. Romanova, L. P. Sashchenko,
Corresponding Member of the RAS N. V. Gnuchev, D. V. Yashin**

Received September 10, 2018

Tag7 (PGRP-S) is an innate immune protein that is involved in the antibacterial and antitumor defense and stimulates the maturation of cytotoxic lymphocyte subpopulations. It was found that the incubation of lymphocytes with Tag7 for 3 days promotes the appearance of cytotoxic NK cells that are active against a number of tumor cell lines.

Keywords: lymphocytes, cytokines, NK cells.

УДК 575.174.4

К АНАЛИЗУ СЛАБОГО ДВУЛОКУСНОГО ОТБОРА ПО ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ И КВАЗИРАВНОВЕСИЯ ПО СЦЕПЛЕНИЮ

В. П. Пасеков

Представлено академиком РАН Е.К. Гинтером 17.01.2018 г.

Поступило 05.10.2018 г.

Анализируется модель слабого отбора по жизнеспособности по двум локусам, заданная обыкновенными дифференциальными уравнениями. Слабый отбор рассматривается как возмущение модели без отбора. С помощью теории возмущений найдена оценка коэффициента D неравновесности по сцеплению в терминах привычных концепций средних эффектов в количественной генетике и в терминах теории сингулярных возмущений в математике. Полученные результаты обобщают выводы М. Кимуры для двух диаллельных локусов на случай множественных аллелей и позволяют стандартизировать анализ слабого действия систематических факторов микроэволюции в популяционной генетике.

Ключевые слова: теоретическая популяционная генетика, математические модели, слабый двулокусный отбор по жизнеспособности, множественные аллели, квазиравновесие по сцеплению, сингулярные возмущения.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846781-785>

Проблемы теоретического анализа генетической детерминации количественных признаков привлекали внимание и разрабатывались со времени возникновения популяционной генетики [1, 2]. Тогда же формализовались понятия аддитивности и эпистаза эффектов генов, детерминирующих величину признака. С точки зрения микроэволюции особый интерес представляет собой такой признак, как жизнеспособность особей, поскольку она самым очевидным образом влияет на динамику генетической структуры популяции.

На заре становления теоретической популяционной генетики были определены основные простые свойства генетической структуры при случайном скрещивании и отсутствии отбора в диплоидной популяции — закон Харди—Вайнберга в отношении одного локуса и предельная с течением времени независимость комбинирования генов в генотипах для нескольких локусов (равновесие по сцеплению). В дальнейшем выяснилась возможность её нарушения, например, из-за отбора, что резко усложняет анализ структуры.

Для модели с непрерывным временем отбора по жизнеспособности в популяции с неперекрывающимися поколениями без возрастной структуры

обоснование использования равновесия по сцеплению было представлено автором [3] на основе выделения быстрых и медленных переменных. Позже появилось доказательство и для модели с дискретным временем [4]. В цитируемых работах случайное комбинирование генов рассматривалось как лишь приближённое, и отклонение от него было изучено в меньшей степени.

В 1965 г. вышла работа М. Кимуры [5], исследовавшего нарушение от свободного сочетания генов в генотипах в случае двух диаллельных локусов при слабом отборе по жизнеспособности. М. Кимура показал, что нарушение такой свободы невелико (т.е. достигается квазиравновесие по сцеплению), и разработал оригинальное обоснование этих результатов. С тех пор к проблеме квазиравновесия привлекались теоретические соображения, в основном качественные, на базе геометрической теории сингулярных возмущений. Такие соображения [6] обосновывают существование квазиравновесия по сцеплению, близкое к почти независимому сочетанию генов в генотипах, но всё-таки не оценивают его количественно явным образом.

Цель настоящей работы — обобщение анализа слабого отбора по жизнеспособности по двум диаллельным локусам на случай множественных аллелей с использованием теории возмущений [7], стандартизация этого анализа, а также анализ оценки квазиравновесия для коэффициента D неравновесности по сцеплению и получение результатов в терминах

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
Федерального исследовательского центра
“Информатика и управление”
Российской Академии наук, Москва
E-mail: pass40@mail.ru

привычных концепций средних эффектов в количественной генетике и в терминах теории сингулярных возмущений в математике.

Основной вывод настоящей работы сформулирован как Результат 4.

ДВУЛОКУСНАЯ МОДЕЛЬ С ДИСКРЕТНЫМ ВРЕМЕНЕМ ПОПУЛЯЦИИ С НЕПЕРЕКРЫВАЮЩИМИСЯ ПОКОЛЕНИЯМИ

Пусть жизненный цикл исследуемой популяции имеет вид: *замещение родительской популяции потомками* → *отбор по жизнеспособности* → *рекомбинация* → *появление потомков (нового поколения)*.

Эффектами редких мутаций будем пренебрегать в предположении анализа динамики на ограниченном промежутке времени. Напомним основные обозначения и известные результаты для двулокусной модели динамики под влиянием рекомбинаций (см., например, [8]). Рассмотрим модель случайно скрещивающейся диплоидной (гаплоидной) популяции с неперекрывающимися поколениями и дискретным временем в отношении концентраций $p_i \equiv p_{i_k i_m}$ гаплоидных генотипов двух аутосомных локусов k и m , несущих аллели с номерами i_k, i_m соответственно, и с вероятностью рекомбинации $r > 0$. Уравнения динамики частот $p_{i_k i_m}$ в модели давления рекомбинаций имеют вид

$$p'_{i_k i_m} = p_{i_k i_m} - r(p_{i_k i_m} - x_{i_k} y_{i_m}) \equiv p_{i_k i_m} - r D_{i_k i_m},$$

$$D'_{i_k i_m} = (1 - r) D_{i_k i_m}; \quad (1)$$

$$x_{i_k} \equiv \sum_{i_m} p_{i_k i_m}, \quad y_{i_m} \equiv \sum_{i_k} p_{i_k i_m},$$

$$D_{i_k i_m} \equiv p_{i_k i_m} - x_{i_k} y_{i_m} \quad (p_{i_k i_m}(t) = x_{i_k}(t) y_{i_m}(t) + D_{i_k i_m}(t)), \quad (2)$$

$x_{i_k}, y_{i_m}, D_{i_k i_m}$ — частоты аллелей k -го и m -го локусов и коэффициент (гаметической) неравновесности по сцеплению соответственно, t — время в поколениях, штрих символизирует следующее поколение. На траекториях (1) частоты аллелей x_{i_k}, y_{i_m} постоянны. При $t \rightarrow \infty$ $D_{i_k i_m}(t) \rightarrow 0, p_{i_k i_m}(t) \rightarrow x_{i_k} y_{i_m}$.

АППРОКСИМАЦИЯ МОДЕЛИ СЛАБОГО ОТБОРА

Уравнения динамики для стадии отбора по жизнеспособности не зависят от того, рассматривается одолокусный или многолокусный случай, и имеют вид

$$p'_i - p_i \equiv \Delta p_i = \frac{v_i(\mathbf{p}, t)}{v(\mathbf{p}, t)} p_i - p_i = \frac{v_i(\mathbf{p}, t) - v(\mathbf{p}, t)}{v(\mathbf{p}, t)} p_i,$$

$$v(\mathbf{p}, t) = \sum_j v_j(\mathbf{p}, t) p_j,$$

где $\mathbf{p}$ — вектор частот гаплоидных генотипов, $v_i(\mathbf{p}, t)$ — жизнеспособность i -го из них.

Будем называть отбор слабым, если вызываемые им изменения генетической структуры за поколение малы при любом генетическом состоянии популяции $\mathbf{p}$, скажем, имеют порядок $O(\mu)$, $0 < \mu \ll 1$. Напомним, что $O(\mu)$ означает, что изменения по модулю меньше либо равны $C|\mu|$ для некоторой положительной константы C .

Результат 1. Для того чтобы эффекты стадии отбора по жизнеспособности в популяции с зависящими от генетического состояния $\mathbf{p}$ относительными жизнеспособностями $v_i = v_i(\mathbf{p})$ генотипов были слабыми, достаточно выполнения условия $|v_i(\mathbf{p}) - v_j(\mathbf{p})| = O(\mu)$, $0 < \mu \ll 1$ для любых $i, j, \mathbf{p}$.

Необходимым условием слабого отбора в популяции с постоянными относительными жизнеспособностями v_i является равенство $v_{\max} - v_{\min} = O(\mu)$, где $v_{\max}$ и $v_{\min}$ обозначают максимальную и минимальную ($v_{\max} > v_{\min}$) относительные жизнеспособности.

Результат 2 [8]. Пусть рассматривается класс моделей, описываемых системой разностных уравнений $\mathbf{p}' = \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}(\mathbf{p}, t)$, где величина координат вектора Δ порядка $O(\mu)$, $0 < \mu \ll 1$. Тогда решение системы данного класса аппроксимируется решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$d\mathbf{p}/dt = \Delta \mathbf{p}(\mathbf{p}, t).$$

Если в модели этого класса диплоидной (гаплоидной) популяции с неперекрывающимися поколениями изменения концентраций гамет $\Delta \mathbf{p}$ в результате давления i -го из нескольких последовательно действующих в течение жизненного цикла факторов микроэволюции за поколение малы, то решение модели аппроксимируется решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$dp/dt = \sum_i \Delta_i p(\mathbf{p}, t).$$

СЛАБЫЙ ОТБОР ПО ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ КАК ВОЗМУЩЕНИЕ

Очевидно, переход к дифференциальным уравнениям возможен лишь при слабом отборе, причём на стадии отбора в гаплоидной популяции

$$dp_i/dt = \mu(v_i(\mathbf{p}, t) - v(\mathbf{p}, t)) p_i;$$

$$v(\mathbf{p}, t) \equiv \sum_i v_i(\mathbf{p}, t) p_i, \quad v_i(\mathbf{p}, t) = O(1).$$

Если принимать в расчёт отбор и рекомбинации, то

$$\begin{aligned} dp_{i_1 i_2} / dt &= \mu(v_{i_1 i_2}(\mathbf{p}) - v(\mathbf{p}))p_{i_1 i_2} - rD_{i_1 i_2}; \\ v(\mathbf{p}) &\equiv \sum_{i_1, i_2} v_{i_1 i_2}(\mathbf{p})p_{i_1 i_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Перейдём от частот гамет p_i к коэффициенту неравновесности по сцеплению D и частотам аллелей:

$$\begin{aligned} D &\equiv p_{11} - xy, \quad x \equiv p_{11} + p_{12} \quad (x_{i_1} = p_{i_1 1} + p_{i_1 2}), \\ y &\equiv p_{11} + p_{21} \quad (y_{i_2} = p_{1 i_2} + p_{2 i_2}); \\ p_{11} &= xy + D, \quad p_{i_1 i_2} = x_{i_1} y_{i_2} + (-1)^{i_1 + i_2} D. \end{aligned} \quad (4)$$

С помощью (3) и (4) можно составить уравнения динамики для переменных D, x, y , но они чрезмерно громоздки для эффективного анализа решения. Обратимся к асимптотическим методам теории возмущений. При слабом по сравнению с рекомбинациями отборе скорость динамики из-за последнего имеет порядок $O(\mu)$, $0 < \mu \ll r$, $r = O(1)$. Тогда эффекты отбора можно рассматривать как малое возмущение модели без отбора. Из определения концентрации аллеля x в (4) следует, что

$$dx/dt = dp_{11}/dt + dp_{12}/dt.$$

Здесь члены из-за рекомбинаций сокращаются, а слагаемые из-за отбора имеют порядок $O(\mu)$, откуда $dx/dt = O(\mu)$. Аналогично $dy/dt = O(\mu)$. Что касается порядка dD/dt , то сюда входят эффекты и отбора, и рекомбинаций, которые запишем как $dD/dt = -rD + \mu F$. Для новых переменных

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} D \\ x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -rD + \mu F \\ \mu O(1) \\ \mu O(1) \end{bmatrix} = -r \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} F \\ O(1) \\ O(1) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$0 < \mu \ll r = O(1).$

Здесь μF соответствует слабому давлению отбора и/или других систематических факторов микроэволюции. Данная система является возмущённой, μ — малый параметр (r не зависит от генотипа и фиксирован).

Результат 3. Пусть рассматривается модель динамики генетической структуры гаплоидной популяции (5) в отношении двух диаллельных локусов. Тогда приближённое значение квазиравновесия для D представимо в виде

$$D^* = \frac{\mu}{r} F(0, x, y), \quad (6)$$

где $\mu F(D, x, y)$ определяет вклад в скорость динамики D слабого давления систематических факторов микроэволюции. Если μF соответствует слабому отбору в гаплоидной популяции с жизнеспособностями генотипов $\{v_{i_1 i_2}(\mathbf{p})\}$, то значением (6) будет

$$D^* = \varepsilon(\mathbf{p}) \frac{\mu}{r} x(1-x)y(1-y), \quad (7)$$

$$\varepsilon(\mathbf{p}) \equiv v_{11}(\mathbf{p}) - v_{12}(\mathbf{p}) - v_{21}(\mathbf{p}) + v_{22}(\mathbf{p}).$$

Квазиравновесие по сцеплению D^* в (7) представимо через генные эффекты в виде, допускающем обобщение на случай множественных аллелей:

$$D^* = (\delta_{11}(\mathbf{p}) - \delta_{1\cdot}^*(\mathbf{p}) - \delta_{\cdot 1}^*(\mathbf{p})) \frac{\mu}{r} x_1 y_1 \equiv \varepsilon_{11}(\mathbf{p}) \frac{\mu}{r} x_1 y_1.$$

Здесь $\delta_{11} = v_{11} - v^*$ — эффект генотипа, $\delta_{1\cdot}^* = y_{1\cdot}^* - v^*$, $\delta_{\cdot 1}^* = v_{\cdot 1}^* - v^*$ — эффекты его аллелей, жирная точка в нижнем индексе означает усреднение (суммирование по индексу на этом месте с весами, равными концентрациям аллелей соответствующего локуса), v^* — популяционное среднее для $v_{i_1 i_2}$ (звёздочка указывает на вычисление при равновесии по сцеплению), $\varepsilon_{11}(\mathbf{p})$ интерпретируется как коэффициент эпистаза. Кроме того, величина D^* имеет порядок $O(\mu^2)$.

Уравнение для отыскания D^* мы получили за счёт использования первых членов разложения в ряд Тейлора функций модели. Оно совпадает с соответствующей частью системы первого приближения асимптотического ряда для решения сингулярно возмущённых уравнений.

СЛАБЫЙ ОТБОР КАК СИНГУЛЯРНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ

Обратим внимание на то, что в возмущённой модели (5) скорость изменения неравновесности D много больше скорости медленно эволюционирующих частот аллелей. Такие системы обыкновенных дифференциальных уравнений с быстрыми и медленными переменными называются сингулярно возмущёнными. Для них на первом этапе с большой скоростью идут изменения быстрых переменных в силу системы, получающейся из исходной (возмущённой) при $\mu = 0$, тогда как медленные переменные практически фиксированы. У нас на этом этапе быстрые переменные сходятся к некоторому устойчивому по первому приближению равновесию, которое в итоге будет функцией фиксированных текущих медленных переменных: неравновесность по сцеплению D сходится к квазиравновесному нулевому значению. На следующем этапе происходит эволюция медленных переменных при условии квазиравновесия быстрых: эволюция частот аллелей идёт под действием отбора при условии равновесия по сцеплению. Здесь неравновесное состояние популяции является одновременно как бы итогом для быстрых переменных и этапом эволюции для медленных. Для решения сингулярно возмущённых

систем можно построить асимптотический ряд (см., например, [9]), в терминах которого приведённые выражения D^* дают первое приближение точного решения.

МНОЖЕСТВЕННЫЕ АЛЛЕЛИ

При множественных аллелях анализируемых локусов генетическое состояние популяции можно описывать либо частотами двулокусных гамет, либо частотами аллелей x_i и y_i и неравновесностями по сцеплению $D_{i_1 i_2}$:

$$x_{i_1} \equiv \sum_{i_2} p_{i_1 i_2}, \quad y_{i_2} \equiv \sum_{i_1} p_{i_1 i_2}, \\ D_{i_1 i_2} \equiv p_{i_1 i_2} - x_{i_1} y_{i_2}, \quad p_{i_1 i_2} = D_{i_1 i_2} + x_{i_1} y_{i_2}.$$

Подобно диаллельному случаю частоты аллелей при слабом отборе будут медленными переменными, а неравновесности $D_{i_1 i_2}$ — быстрыми. Динамика в случае множественных аллелей качественно не отличается от наблюдаемой при диаллельных локусах. При слабом давлении $\{\mu F_{i_1 i_2}\}$ систематических факторов уравнения динамики генетического состояния популяции в терминах (уже не одной, а ряда) неравновесностей по сцеплению $D_{i_1 i_2}$ и частот аллелей по-прежнему имеют вид (5), где теперь $\mathbf{D}$, $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ будут векторами.

Результат 4. Пусть рассматривается модель динамики генетической структуры гаплоидной популяции в отношении двух локусов с множественными аллелями при слабом давлении систематических факторов микроэволюции. Тогда приближённым квазиравновесным значением коэффициента $D_{i_1 i_2}$ будет $D_{i_1 i_2}^* = \frac{\mu}{r} F_{i_1 i_2}(\mathbf{0}, \mathbf{x}, \mathbf{y})$, а при слабом отборе по жизнеспособности

$$D_{i_1 i_2}^* = \varepsilon_{i_1 i_2}(\mathbf{p}) \frac{\mu}{r} x_{i_1} y_{i_2}, \quad \varepsilon_{i_1 i_2}(\mathbf{p}) \equiv (\delta_{i_1 i_2} - \delta_{i_1}^* - \delta_{i_2}^*).$$

ДИПЛОИДНЫЕ ПОПУЛЯЦИИ

В диплоидной популяции со случайным скрещиванием уравнения динамики генетической струк-

туры (на уровне гамет), рассматриваемой в отношении двух диаллельных аутосомных локусов, формально совпадают с уравнениями (3) для гаплоидного случая, но теперь жизнеспособность i -го гаплоидного генотипа (гаметы) будет средней при условии учёта лишь генотипов, порождённых слиянием i -й и какими-либо ещё гаметками.

Тем не менее выводы для гаплоидного случая остаются верными, только в них жизнеспособности гамет следует понимать как указанные условные средние, а зависимости от v_i (например в выражении для ε) — как зависимости от их усреднённых значений, поскольку все манипуляции над (3) для получения результатов допускали зависимость жизнеспособностей от $\mathbf{p}$. Первое приближение для неравновесности по сцеплению, например, для двух диаллельных локусов записывается как

$$D^* = \bar{\varepsilon} \frac{\mu}{r} x(1-x)y(1-y), \quad \bar{\varepsilon} \equiv \overline{v_{11}} - \overline{v_{12}} - \overline{v_{21}} + \overline{v_{22}},$$

где надчёркивание означает усреднение по отсутствующим в индексе символам второй гаметы диплоидного генотипа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fisher R.A. // Trans. Roy. Soc. Edinburgh. 1918. V. 52. Pt 2. P. 399–433.
2. Hill W.G. // Genome. 1989. V. 31. № 1. P. 190–195.
3. Пасек В.П. // ДАН. 1984. Т. 277. № 6. С. 1338–1341.
4. Nagylaki T. // Genetics. 1993. V. 134. № 6. P. 624–647.
5. Kimura M. // Genetics. 1965. V. 52. № 5. P. 875–890.
6. Shahshahani S. // Mem. Amer. Math. Soc. 1979. V. 7. № 211. 34 p.
7. Banasiak J., Lachowicz M. Methods of Small Parameter in Mathematical Biology. B.: Springer, 2014. 285 p.
8. Свирежев Ю.М., Пасек В.П. Основы математической генетики. М.: Наука, 1982. 511 с.
9. Новожилов И.В. Методы разделения движений: Конспект лекций. М.: МЭИ, 1981. 48 с.

TO THE ANALYSIS OF WEAK TWO-LOCUS VIABILITY SELECTION AND QUASI LINKAGE EQUILIBRIUM

V. P. Pasekov

Presented by Academician of the RAS E.K. Ginter January 17, 2018

Received October 5, 2018

A model of weak viability selection at two multi-allele loci with standardization of approaches through the use of perturbation theory is examined. The estimate of the quasi-equilibrium value for the linkage disequilibrium coefficient D is analyzed, and results in terms of average effects in quantitative genetics and in terms of the theory of singular perturbations in mathematics are obtained. The approximation of a discrete-time model of a random mating population with non-overlapping generations under weak selection by ordinary differential equations is considered. Weak selection is considered as a perturbation of the model without selection. The resulting model is singularly perturbed; that is, fast (D) and slow (allele frequencies) variables can be distinguished. The first approximation equation for quasi-equilibrium of D is obtained using the first terms of the Taylor series expansion of the model functions. It coincides with the corresponding part of the system of the first approximation of the asymptotic series for solving singularly perturbed equations.

Keywords: theoretical population genetics, mathematical models, weak two-locus viability selection, multiple alleles, quasi linkage equilibrium, singular perturbations.

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК

ТОМ 484

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

I. МАТЕМАТИКА

Абузярова Н. Ф. Обратимые по Эренпрайсу функции в алгебре Шварца	7	Гётце Ф., Наумов А. А., Тихомиров А. Н. Об оптимальных оценках в локальном полукруглом законе при четырёх моментах	265
Владыкина В. Е., Шкаликов А. А. Спектральные свойства обыкновенных дифференциальных операторов с инволюцией	12	Романов В. Г. Об определении диэлектрической проницаемости по модулю вектора электрической напряжённости высокочастотного электромагнитного поля	269
Хромов А. П., Корнев В. В. Классическое и обобщённое решения смешанной задачи для неоднородного волнового уравнения	18	Фельдман Г. М. К теореме С.Р. Рао для локально компактных абелевых групп	273
Алимов А. Р., Щепин Е. В. Выпуклость солнц по касательным направлениям	131	Кельманов А. В., Пяткин А. В., Хандеев В. И. О сложности некоторых задач поиска семейства непересекающихся кластеров	387
Аллилуева А. И., Шафаревич А. И. Двойное асимптотическое разложение разрешающего оператора задачи Коши для линеаризованной системы газовой динамики	134	Кислицын А. А., Козлова А. Б., Корсакова М. Б., Орлов Ю. Н. Индикатор разладки для нестационарных случайных процессов	393
Ардентов А. А., Сачков Ю. Л. Субфинслерова задача на группе Картана	138	Степин С. А., Фуфаев В. В. Спектральная деформация в одной задаче сингулярной теории возмущений	397
Водопьянов С. К. Основы квазиконформного анализа двухиндексной шкалы пространственных отображений	142	Яковлев П. А. Метод быстрого множественного попарного выравнивания на основе префиксных деревьев	401
Насибов Ш. М. Об отсутствии глобальных решений смешанной задачи для нелинейного эволюционного уравнения типа Гинзбурга—Ландау	147	Егорова А. Н., Жуковский М. Е. Опровержение закона нуля или единицы для экзистенциальных монадических свойств разреженного биномиального случайного графа	519
Бесов О. В. Вложения пространств функций положительной гладкости на нерегулярных областях	255	Ибрагимов И. А., Смородина Н. В., Фаддеев М. М. Одна конструкция отражающихся процессов Леви	523
Брюно А. Д. Разложение решений обыкновенного дифференциального уравнения в трансряды	260		

Карманова М. Б. Локальные метрические свойства поверхностей уровня на пространствах Карно–Каратеодори

527

методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ^{11}B

678

Аптекарев А. И., Рыков Ю. Г. Детализация механизма эволюции особенностей в системе уравнений газовой динамики без давления

655

VI. ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Белега Е. Д., Трубников Д. Н. Молекулярная динамика кластеров воды и потенциалы взаимодействия

659

Ганиев С. Р., Кузнецов Ю. С., Шмырков О. В. Нелинейные волновые и кавитационные процессы и их влияние на механические свойства вязких растворов

410

Беляева Ю. О., Скубачевский А. Л. О классических решениях первой смешанной задачи для системы уравнений Власова–Пуассона в бесконечном цилиндре

663

Ерофеев В. Я., Кабанов М. В. Вариации деформационных параметров никелида титана при циклировании в интервале мартенситного превращения

682

Гасников А. В., Горбунов Э. А., Ковалев Д. А., Мохаммед А. А. М., Черноусова Е. О. О достижимости оптимальных оценок скорости сходимости численных методов выпуклой оптимизации высоких порядков

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Григорьева Е. В., Кашенко С. А. Медленные и быстрые колебания в модели оптико-электронного осциллятора с запаздыванием

21

Воропаев С. А., Днестровский А. Ю., Маров М. Я. Особенности формирования приливного выступа ранней Луны

150

686

Бетелин В. Б., Галкин В. А. О возникновении структур в нелинейных задачах физической кинетики

532

III. ИНФОРМАТИКА

Будунова К. А., Кравченко В. Ф., Пустовойт В. И. Обобщение теоремы Кравченко–Котельникова спектрами финитных бесконечно дифференцируемых функций $h_{a(m)}(x)$

405

Вохминцев А. В., Мельников А. В., Миронов К. В., Бурлуцкий В. В. Реконструкция трёхмерных сцен на основе точных решений вариационной задачи регистрации мультисенсорных данных

672

IV. ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Ильин А. В., Атамась Е. И., Фомичев В. В. Обращение гипервыходных систем с запаздыванием

538

V. ФИЗИКА

Хомич В. Ю., Шмаков В. А. Поглощение лазерного излучения металлами при формировании поверхностных наноструктур

26

Покатилов В. С., Сигов А. С., Макарова А. О., Покатилов В. В., Певцов Е. Ф. Исследование аморфных сплавов $\text{Fe}_{85-x}\text{Cr}_x\text{B}_{15}$ ($x = 0 - 20$)

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 484 № 6 2019

VII. АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА, КОСМОЛОГИЯ

Маров М. Я., Русол А. В., Дорофеева В. А. Численное моделирование длительной тепловой эволюции ядер короткопериодических комет на примере ядра кометы 67P/Чурюмова–Герасименко

21

VIII. ЭНЕРГЕТИКА

Клименко В. В., Федотова Е. В. Гидроэнергетика России в условиях глобальных изменений климата

156

IX. МЕХАНИКА

Бабешко В. А., Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Павлова А. В., Телятников И. С., Федоренко А. Г. К теории блочных структур в проблеме прочности штолен и конструкций с множественными соединениями

672

29

Бакулин В. Н. Блочная конечно-элементная модель послойного анализа напряжённо-деформированного состояния трёхслойных в общем случае нерегулярных оболочек вращения двойной кривизны

538

35

Ивашкин В. В., Лан Аньци. Оптимальные траектории для экспедиции Земля–астероид–Земля при полёте с большой тягой

26

161

Глазов А. Л., Морозов Н. Ф., Муратиков К. Л. Лазерная фотоакустическая регистрация остаточных напряжений в металлических пластинках с отверстием

277

Голубев Ю. Ф., Грушевский А. В., Корянов В. В., Тучин А. Г., Тучин Д. А. Синтез орбит космических аппаратов с большим наклоном посредством гравитационных манёвров около Венеры

Кречетников Р. В. О сингулярности движущейся контактной линии

Решмин С. А. Качественный анализ нежелательного эффекта потери силы тяги транспортного средства во время интенсивного старта

Кульков В. М., Егоров Ю. Г., Фирсюк С. О., Терентьев В. В., Шемяков А. О. Моделирование управления кинетическим моментом малых космических аппаратов с магнитной системой ориентации

Никитин Н. В., Пиманов В. О., Попеленская Н. В. К вопросу о механизме образования вторичных течений Прандтля 2-го рода

Остапенко В. В. О применении уравнений Грина—Нагди для моделирования волновых течений с ондулярными борами

Зубов Л. М. Большие деформации цилиндрической трубы с предварительно напряжёнными покрытиями

Кульчин Ю. Н., Рагозина В. Е., Дудко О. В. О распространении упругих возмущений в среде с большими необратимыми предварительными деформациями

Попов Е. Л., Самсонов А. Н., Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. МГД-эффекты при непрерывной спиновой детонации

Х. ХИМИЯ

Малинина Е. А., Скачкова В. К., Козерожец И. В., Авдеева В. В., Гоева Л. В., Бузанов Г. А., Шаулов А. Ю., Берлин А. А., Кузнецов Н. Т. Формирование наноразмерного додекагидро-клозо-додекабората натрия $\text{Na}_2[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]$ на поверхности силикатной матрицы

Ягодников Д. А., Гусейнов Ш. Л., Стороженко П. А., Шпара А. П., Сухов А. В., Федоров С. Г. Морфологический, химический и спектральный анализы продуктов сгорания микро- и нанодисперсных частиц боридов алюминия

Тарасова Н. П., Межуев Я. О., Занин А. А., Кривобородов Е. Г. О взаимодействии ионных жидкостей с серой

Гончарова О. А., Глазкова А. Т., Лизгина К. В., Пирязев А. А., Корякин С. Л., Конев Д. В., Воротынцев М. А., Минцев В. Б. Электровосстанов-

ление бромат-аниона на микроэлектроде при избытке кислоты: решение обратной кинетической задачи

281 Дедов А. Г., Шляхтин О. А., Локтев А. С., Мазо Г. Н., Малышев С. А., Моисеев И. И. Новые металл-оксидные композитные материалы — эффективные катализаторы кислородной конверсии метана

285 Чекуров К. Е., Барабанова А. И., Благодатских И. В., Локшин Б. В., Перегудов А. С., Абрамчук С. С., Хохлов А. Р. Синтез и самоассоциация амфифильных диблок-сополимеров 2,3,4,5,6-пентафторстирола

415 Ваганова И. В., Маскаева Л. Н., Воронин В. И., Марков В. Ф., Бамбуров В. Г. Новый подход при рентгеновском исследовании микроструктуры плёнок пересыщенных твёрдых растворов замещения $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$

420 Лебедев А. С., Еремяшев В. Е., Трофимов Е. А., Анфилов В. Н. Термодинамический анализ взаимодействия компонентов в системе $\text{Si}-\text{C}-\text{O}$ в процессе карботермического синтеза карбида кремния

426 Морозов Е. В., Бузник В. М., Беспалов А. С., Гращенко Д. В. Магнитно-резонансная томография водопоглощения высокопористыми керамическими материалами

542 Половинкина М. А., Коляда М. Н., Осипова В. П., Берберова Н. Т., Чукичева И. Ю., Шумова О. А., Кучин А. В. Редокс-свойства и антирадикальная активность терпенофенолов

547 Пипко И. И., Пугач С. П., Савичев О. Г., Репина И. А., Шахова Н. Е., Моисеева Ю. А., Барсков К. В., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Динамика растворённого неорганического углерода и потоков CO_2 между водой и атмосферой в главном русле реки Обь

550 Пугачев А. Д., Лукьянова М. Б., Ткачев В. В., Лукьянов Б. С., Макарова Н. И., Шилов Г. В., Ростовцева И. А., Лапшина Л. С., Минкин В. И., Алдошин С. М. Новые фотохромные солевые спиропираны индолинового ряда

XI. ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

44 Бажин Н. М., Пармон В. Н. Гидроосмотическое давление

Индеев Д. А., Осипова Е. В. Формирование поверхностного слоя водорода в чистом алюминии

Ведмидь Л. Б., Федорова О. М., Димитров В. М., Балакирев В. Ф. Структура и термические свой-

294

299

431

554

559

563

568

691

698

52

56

- ства TmFe_2O_4 при различных значениях температуры и давления кислорода 177
- Хорошилов А. В., Ашмарин А. А., Гуськов В. Н., Са-
зонов Е. Г., Гавричев К. С., Новоторцев В. М.**
Теплоёмкость и термическое расширение тан-
талата иттрия 436
- Дадаян А. К., Борисов Ю. А., Бочаров Э. В., Золо-
тарев Ю. А., Нагаев И. Ю., Мясоедов Н. Ф.**
Твёрдофазный каталитический изотопный об-
мен водорода на дейтерий в циклопролилли-
глицине 181
- Дракон А. В., Еремин А. В., Азатян В. В.** Особен-
ности влияния галогеналканов на concentra-
ционные пределы и период индукции воспла-
менения метано-воздушных смесей 572
- Варфоломеев С. Д., Семенова Н. А., Быков В. И.,
Цыбенова С. Б.** Кинетика химических процес-
сов в мозге человека. Триггер-эффект и авто-
стабилизация N-ацетиласпарагиновой кис-
лоты 307
- Колосов В. Н., Орлов В. М.** Электронно-опосредо-
ванные реакции при металлотермическом вос-
становлении оксидных соединений молибдена
и вольфрама 312
- Чесноков В. В., Чичкань А. С., Пармон В. Н.**
Влияние катализаторов "кобальт-углеродные
нанотрубки" на процесс коксования антра-
цена 441
- Вильданова М. Ф., Никольская А. Б., Козлов С. С.,
Карягина О. К., Ларина Л. Л., Шевалеев-
ский О. И., Альмяшева О. В., Гусаров В. В.** На-
нотрубки на основе системы $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ для
перовскитных солнечных элементов 709
- ## XII. ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
- Алымов М. И., Рубцов Н. М., Сеплярский Б. С., Зе-
ленский В. А., Анкудинов А. Б., Ковалев И. Д.,
Кочетков Р. А., Щукин А. С., Петров Е. В., Ко-
четов Н. А.** Синтез нанопорошка никеля
с контролируемой пиррофорностью и средним
размером 447
- Сеплярский Б. С., Рубцов Н. М., Ивлева Т. П., Алы-
мов М. И.** Влияние начальной температуры на
режимы пассивации пиррофорных нанопо-
рошков (макрокинетический подход) 61
- Мешалкин В. П., Ивашкин Ю. А., Никитина М. А.**
Компьютерная мультиагентная модель хими-
ко-физиологических процессов в желудоч-
но-кишечном тракте человека как в живой био-
химической системе 66
- Гнедовец А. Г., Зеленский В. А., Анкудинов А. Б.,
Алымов М. И.** Высокопористый никель с ие-
рархической структурой, синтезированный в
процессе спекания-испарения металлического
нанопорошка и порообразователя 71
- Делицын Л. М.** Распределение Nb и Ce между
двумя несмешивающимися расплавами в сис-
теме $\text{CePO}_4\text{--SiO}_2\text{--NaF--Fe}_2\text{O}_3\text{--Nb}_2\text{O}_5$ 184
- Хлусов И. А., Киблер Э. В., Кудрявцева В. Л., Твер-
дохлебов С. И., Бельбасов Е. Н., Ботвин В. В.,
Латыпов А. Д., Газатова Н. Д., Литвинова Л. С.,
Бузник В. М., Чойнзонов Е. Л.** Получение мето-
дом электрораспыления капсул из биосовме-
стимого сополимера лактида и гликолида с
включением интерферона 187
- Чижилов А. П., Столин А. М., Бажин П. М., Алы-
мов М. И.** Формирование керамических полых
стержней методом СВС-экструзии 191
- ## XIII. ГЕОЛОГИЯ
- Антонюк Р. М., Третьяков А. А., Дегтярев К. Е., Ко-
тов А. Б.** Раннеордовикский щелочно-ультра-
основной Жиландинский комплекс Централь-
ного Казахстана: строение и обоснование воз-
раста 436
- Бирюков А. А., Волков А. В., Мурашов К. Ю., Си-
доров А. А.** Особенности рудообразования мес-
торожений золота Глухаринского рудного узла
(Приколымский террейн) 61
- Проскурнин В. Ф., Пальянова Г. А., Гавриш А. В.,
Петрушков Б. С., Багаева А. А., Бортников Н. С.**
Геология, минеральные ассоциации и состав
самородного золота минеральных месторож-
дений Таймыро-Североземельского орогена 71
- Болотский И. Ю., Болотский Ю. Л., Сорокин А. П.**
Первая находка когтевой фаланги дромеозав-
риды (Dinosauria: Dromaeosauridae) из Благове-
щенского местонахождения позднемиоценовых
динозавров (Амурская область) 184
- Захаров Ю. Д., Бяков А. С., Хорачек М., Горя-
чев Н. А., Ведерников И. Л.** Первые данные по
изотопному составу азота в перми и триасе Се-
веро-Востока России и их значение для палео-
температурных реконструкций 187
- Когарко Л. Н., Веселовский Р. В.** Геодинамический
режим карбонатитов — метод палеореконструк-
ций 191
- Прияткина Н. С., Кузнецов Н. Б., Рудько С. В.,
Щацкило А. В., Худолей А. К., Романюк Т. В.,
Маслов А. В.** Погорюйская свита протерозоя
Енисейского кряжа: возраст и источники сноса

- по данным U—Pb-изотопного датирования обломочных цирконов 195
- Ткачев А. В., Рундквист Д. В., Вишневская Н. А.** Главные геоисторические особенности металлогении лития 200
- Буртман В. С.** Дизъюнктивные дислокации в верхней коре Тянь-Шаня 316
- Викентьев И. В., Белогуб Е. В., Молошаг В. П., Еремин Н. И.** Селен в колчеданных рудах 320
- Котов А. Б., Сковитина Т. М., Ковач В. П., Скляров Е. В., Донская Т. В., Лопатин Д. В., Плоткина Ю. В., Толмачева Е. В., Гороховский Б. М., Бучнев И. Н.** Источники и области сноса позднекайнозойских песчаных отложений острова Ольхон (Байкальская рифтовая зона) 325
- Лучицкая М. В., Соколов С. Д., Вержбицкий В. Е., Ватрушкина Е. В., Ганелин А. В., Голионко Б. Г.** Постколлизийные гранитоиды и апт-альбское растяжение в тектонической эволюции чукотских мезозойских Северо-Восток России 329
- Заика В. А., Сорокин А. А., Ковач В. П., Сорокин А. П., Котов А. Б.** Возраст и источники нижнемезозойских метаосадочных пород Унья-Бомского террейна Монголо-Охотского складчатого пояса: результаты геохронологических (LA-ICP-MS) U—Th—Pb- и изотопных Sm—Nd-исследований 455
- Дегтярев К. Е., Третьяков А. А., Сальникова Е. Б., Котов А. Б.** Кумыстинский граносиенитовый комплекс позднего криогения в Большом Каратау (Южный Казахстан), обоснование возраста 579
- Киселев А. И., Ярмолюк В. В.** Раннеюрский магматизм Кобьюминской системы грабен (Верхоянское обрамление Сибирской платформы) и его геодинамическая природа 584
- Морозов Ю. А., Матвеев М. А., Смульская А. И., Кулаковский А. Л.** Псевдотахилиты — два генетических типа 589
- Округин А. В., Якубович О. В., Гедз А. М., Земнухов А. Л., Иванов П. О.** Минералогическо-геохимические типы и ^{190}Pt — ^4He -возраст железистой платины из россыпей бассейна р. Анабар (Северо-Восток Сибирской платформы) 716
- Ковалев С. Г., Пучков В. Н., Ковалев С. С., Высоцкий С. И.** Редкие Th—Sc-минералы в пикритах Южного Урала и их генетическое значение 721
- Кузнецов А. Б., Лобач-Жученко С. Б., Каулина Т. В., Константинова Г. В.** Палеопротерозойский возраст карбонатных пород и трондjemитов центральноприазовской серии: Sr-изотопная хемотратиграфия и U—Pb-геохронология 725
- Левин Б. В., Сасорова Е. В., Гурьянов В. Б., Ярмолюк В. В.** Связь глобальной вулканической активности и вариаций скорости вращения Земли 729
- Овчинников Р. О., Сорокин А. А., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Ковач В. П., Сорокин А. П.** Экзотический Инимский блок Аргунского континентального массива центрально-азиатского складчатого пояса: результаты геохронологических (LA-ICP-MS) U—Th—Pb- и изотопно-геохимических Sm—Nd-исследований 734
- #### XIV. ГЕОХИМИЯ
- Романюк Т. В., Кузнецов Н. Б., Пучков В. Н., Сергеева Н. Д., Паверман В. И., Горожанин В. М., Горожанина Е. Н.** Локальный источник обломочного материала для пород айской свиты (основание разреза стратотипа нижнего рифея, Башкирское поднятие, Южный Урал) по результатам U/Pb-датирования (LA-ICP-MS) детритовых цирконов 77
- Сокерина Н. В., Зыкин Н. Н., Шанина С. Н., Валяева О. В., Исаенко С. И., Сокерин М. Ю.** Условия образования вмещающих пород и жильных образований продуктивных отложений Астраханского газоконденсатного месторождения 82
- Богатов В. В., Прозорова Л. А., Чернова Е. Н., Лысенко Е. В., Нго Х. К., Тран Т. Т., Хоанг Н. С.** Аккумуляция тяжёлых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков (*Bivalvia*) из природных озёр Восточного Сихотэ-Алиня (Россия) и дельты Меконга (Вьетнам) 206
- Лиханов И. И., Козлов П. С., Савко К. А., Зиновьев С. В., Крылов А. А.** Первые петрологические свидетельства субдукции на западной окраине Сибирского кратона 209
- Щепетова О. В., Корсаков А. В., Зеленовский П. С., Михайленко Д. С.** К вопросу о механизме образования разупорядоченного графита в алмазных комплексах сверхвысоких давлений 215
- Юсупова И. Ф.** Роль органического вещества в формировании свойств сланцевой залежи 220
- Будяк А. Е., Скузоватов С. Ю., Тарасова Ю. И., Ванг К.-Л., Горячев Н. А.** Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудосносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона 335

Иванов К. С., Берзин С. В., Ерохин Ю. В., Ронкин Ю. Л., Хиллер В. В. Время задугового спрединга Уральской палеоостровной дуги (по результатам Sm–Nd- и U–Pb-датирования долеритов и изучения состава включений в цирконе)

340

Лобач-Жученко С. Б., Каулина Т. В., Марин Ю. Б., Юрченко А. В., Скублов С. Г., Егорова Ю. С., Галанкина О. Л., Сергеев С. А. Палеоархейский U–Pb (SIMS SHRIMP-II)-возраст мафических гранулитов побужского комплекса Украинского щита

Горячев Н. А., Игнатьев А. В., Веливецкая Т. А., Будяк А. Е., Тарасова Ю. И. Опыт применения локального анализа изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших месторождений Бодайбинского синклинория (Восточная Сибирь)

Кашаев А. А., Иванова Л. А., Медведев В. Я., Ушаковская З. Ф. Новое соединение из чароитового субстрата $(K, Na)_3Ca_8Si_6[Si_4O_{12}]_3$

464

Рыцк Е. Ю., Сальникова Е. Б., Ярмолюк В. В., Андреев А. А., Богомолов Е. С., Лебедева Ю. М., Великославинский С. Д., Анисимова И. В., Плоткина Ю. В., Федосеенко А. М. Раннекембрийский возраст и коровые источники гранитоидов горячинского плутона (Северное Прибайкалье): геодинамические следствия

468

Чугаев А. В., Чернышев И. В., Будяк А. Е., Манджиева Г. В., Садасюк А. С., Гареев Б. И. Вариации изотопного отношения $^{238}U/^{235}U$ в метаосадочных породах и свидетельство изменения условий осадконакопления в неопротерозое в эдиакарское время

472

Котельников А. Р., Сук Н. И., Коржинская В. С., Котельникова З. А., Шаповалов Ю. Б. Межфазовое разделение редких и редкоземельных элементов в силикатно-фторидных системах при $T = 800\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ Кбар (экспериментальные исследования)

595

Немировская И. А., Онегина В. Д., Лисицын А. П., Коновалов Б. В. Происхождение углеводородов во взвеси и донных осадках в районе Крымского п-ва

600

Чашечкин Ю. Д., Розенталь О. М. Физическая природа неоднородности состава речных вод

605

Лиханова И. И., Савко К. А. Первые данные о природе и возрасте протолита высокобарических тектонитов Енисейского кряжа: связь с ранним этапом формирования палеоазиатского океана

739

XV. ГЕОФИЗИКА

Злобина Т. М., Петров В. А., Мурашов К. Ю., Котов А. А. Влияние сейсмических механизмов деформаций на миграцию флюидов в сфере накопления золоторудных концентраций

87

Мордвинова В. В., Кобелев М. М., Хритова М. А., Турутанов Е. Х., Кобелева Е. А., Трынкова Д. С., Цыдыпов Л. Р. Глубинная скоростная структура южной окраины Сибирского кратона и Байкальский рифтогенез

93

Павленко О. В. Ударная волна как возможный механизм генерации аномально высоких ускорений при $M = 9,0$ землетрясении Тохоку 11 марта 2011 г.

98

Лобковский Л. И., Рамазанов М. М. К теории фильтрации в среде с двойной пористостью

348

Воробьева И. А., Соловьев А. А., Шебакин П. Н. Картирование межплитового сцепления в Камчатской зоне субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности

478

Левин Б. В., Ковалев П. Д., Ковалев Д. П., Кириллов К. В. Затухание гравитационных волн под припаем

482

Сорокин А. Г., Ключевский А. В. Инфразвуковые сигналы от землетрясений 5 декабря 2014 г. в акватории оз. Хубсугул (Северная Монголия)

610

Гаврилов В. А., Ландер А. В., Морозова Ю. В. Сопоставление данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений с данными по механизмам очагов землетрясений

745

XVI. ГЕОГРАФИЯ

Сизов А. А., Михайлова Н. В., Баянкина Т. М. Режимы крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана в Норвежском и Баренцевом морях

615

Сухоруков Б. Л., Никаноров А. М. Новые возможности дистанционной спектрометрии поверхностных водных объектов

750

XVII. ОКЕАНОЛОГИЯ

Дубинина Е. О., Мирошников А. Ю., Коссова С. А., Флинт М. В. Численная оценка степени модификации опреснённых морских вод на примере шельфа моря Лаптевых

352

Шакиров Р. Б., Хынг Зыонг Куок, Сырбу Н. С., Ань Ле Дык, Обжиров А. И., Борзова О. В., Окулов А. К., Нам Буи Ван, Диен Нгуен Ван, Донг

- Ман Дук, Легкодимов А. А., Шакирова М. В., Пономарева А. В., Бакунина М. С. Особенности распределения аномальных газогеохимических полей рифта Красной Реки (Тонкинский залив, Южно-Китайское море) 487
- Белевич Т. А., Ильин Л. В., Арашкевич Е. Г., Флинт М. В. Пикофитопланктон моря Лаптевых в осенний период 619
- Бошеняттов Б. В., Жильцов К. Н. Особенности вихревого подавления волн цунами подводными барьерами 755
- XVIII. БИОХИМИЯ, БИОФИЗИКА, МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ**
- Махаева Г. Ф., Шевцова Е. Ф., Болтнева Н. П., Ковалёва Н. В., Рудакова Е. В., Дубова Л. Г., Шевцов П. Н., Бачурин С. О. Антихолинэстеразная и антиоксидантная активность новых бинарных конъюгатов γ -карболинов 104
- Рязанцев Д. Ю., Рогожин Е. А., Цветков В. О., Яруллина Л. Г., Смирнов А. Н., Завриев С. К. Разнообразие харпиноподобных защитных пептидов из семян ежовника (*Echinochloa crus-galli* L.) 109
- Шенкарев З. О., Шулепо М. А., Пеньёр С., Мышкин М. Ю., Беркут А. А., Василевский А. А., Титгат Я., Люкманова Е. Н., Кирпичников М. П. Рекомбинантная продукция и структурно-функциональная характеристика токсина TS_i из яда бразильского скорпиона *Tityus serrulatus* 112
- Глебездина Н. С., Олина А. А., Некрасова И. В., Кукина Е. М. Молекулярные механизмы контроля дифференцировки регуляторных Т-лимфоцитов экзогенным мелатонином 224
- Деева О. А., Пантिलеев А. С., Рыбина И. В., Яркова М. А., Гудашева Т. А., Середенин С. Б. Новый дипептидный лиганд TSPO 228
- Красильников П. М., Лукашев Е. П., Нокс П. П., Сейфуллина Н. Х., Рубин А. Б. Внутримолекулярная подвижность влияет на миграцию энергии от квантовых точек к реакционным центрам фотосинтезирующих бактерий *Rb. sphaeroides* 233
- Семенова Н. А., Меньшиков П. Е., Манжурцев А. В., Ублинский М. В., Ахадов Т. А., Варфоломеев С. Д. Динамика прижизненной концентрации метаболитов аминокислот в головном мозге человека в посттравматическом периоде 238
- Филлюшин М. А., Кочиева Е. З., Щенникова А. В., Белецкий А. В., Марданов А. В., Равин Н. В., Скрыбин К. Г. Идентификация и анализ экспрессии генов хитиназ в ловчих аппаратах насекомоядного растения *Nepenthes* sp. в процессе развития 358
- Четверина Д. А., Михайлова А. В., Георгиев П. Г., Ерохин М. М. Новый PRE-элемент генома *Drosophila virilis* как удобный модельный сайленсер 363
- Юрина Л. В., Васильева А. Д., Бугрова А. Е., Индейкина М. И., Кононихин А. С., Николаев Е. Н., Розенфельд М. А. Индуцированная гипохлоритом окислительная модификация фибриногена 367
- Баландин С. В., Финкина Е. И., Нурмухамедова Э. К.-А., Тагаев А. А., Умнякова Е. С., Кокряков В. Н., Швеи В. И., Овчинникова Т. В. Биотехнологический способ получения и характеристика рекомбинантного антимикробного пептида авицина А из *Enterococcus avium* 491
- Ерохин М. М., Михайлова А. В., Георгиев П. Г., Четверина Д. А. Влияние транскрипции на активность энхансера гена white, интегрированного в интрон 495
- Кувейда Е. В., Губарева Е. А., Басов А. А., Крашенинников С. В., Григорьев Т. Е., Гуменюк И. С., Джимах С. С., Качанова О. А., Чвалун С. Н. Опыт применения антисептиков для обработки биологических матриксных лёгких крыс 498
- Салаяев Р. К., Рекославская Н. И., Столбиков А. С. Новая растительная экспрессионная система для создания вакцин против папилломавирусов 503
- Хорошко В. А., Похолокова Г. В., Зыкова Т. Ю., Осадчий И. С., Жимулев И. Ф. Локализация гена dunce в большой серии близлежащих структур политенной хромосомы *Drosophila melanogaster* 507
- Аутеншлюс А. И., Голованова А. В., Студеникина А. А., Брусенцов И. И., Проскура А. В., Жураковский И. П., Архипов С. А., Сидоров С. В., Вавилин В. А., Ляхович В. В. Персонифицированный подход к оценке экспрессии мРНК гистидинбогатого гликопротеина и иммуногистохимических маркеров при заболеваниях молочной железы 624
- Крутецкая З. И., Мельницкая А. В., Антонов В. Г., Ноздрачев А. Д. Антагонисты рецепторов сигма-1 галоперидол и хлорпромазин модулируют влияние глутоксида на транспорт Na⁺ в коже лягушки 629
- Татарский Е. В., Георгиев Г. П., Сошникова Н. В. Онкоген *c-MYC* контролирует экспрессию

- РНF10, субъединицы ремоделирующего хроматин комплекса PBAF, в клеточной линии SW620 633
- Храмцов П. В., Кропанева М. Д., Бочкова М. С., Тимганова В. П., Заморина С. А., Раев М. Б. Разработка иммуносорбента для твёрдофазного ЯМР-анализа
- Ширшев С. В., Некрасова И. В., Горбунова О. Л., Орлова Е. Г. Регуляция женскими половыми стероидами экспрессии рекомбиназы RAG-1 в лимфоцитах Treg и Th17, роль онкостатина M
- Бахтюков А. А., Деркач К. В., Дарьин Д. В., Шпаков А. О. Стероидогенный эффект низкомолекулярного агониста рецептора лютеинизирующего гормона при его введении крысам-самцам
- Губарева Е. А., Куевда Е. В., Каде А. Х., Быков И. М., Павлюченко И. И., Гайворонская Т. В., Сидоренко А. Н., Цымбалов О. В., Овсянников В. Г., Мясникова В. В., Шашков Д. И., Джимаков С. С. Оценка качества децеллюляризации и рецеллюляризации тканеинженерных конструкций методом хемилюминесценции
- Летута У. Г., Тихонова Т. А. Влияние магнитных полей и магнитного изотопа ^{25}Mg на образование биоплёнок бактериями *E. coli*
- Махотенко А. В., Хромов А. В., Снигирь Е. А., Макарова С. С., Макаров В. В., Супрунова Т. П., Калинина Н. О., Тальянский М. Э. Функциональный анализ роли коилина в устойчивости растений картофеля *Solanum tuberosum* к вирусной инфекции и абиотическим стрессам с использованием системы редактирования CRISPR-Cas9
- Шарапова Т. Н., Романова Е. А., Сашенко Л. П., Гнучев Н. В., Яшин Д. В. Белок врождённого иммунитета Tag7 после инкубации с лимфоцитами стимулирует появление цитотоксических NK-клеток 777
- ### XIX. ФИЗИОЛОГИЯ
- 637 Муровец В. О., Созонтов Е. А., Зачепило Т. Г. Влияние вкусового рецепторного белка T1R3 на развитие островковой ткани поджелудочной железы мыши 117
- 641 Калинина Н. И., Зайцев А. В., Веселкин Н. П. Серотонин по-разному модулирует функциональные свойства повреждённых и неповреждённых мотонейронов спинного мозга лягушки 372
- 760 Лобов Г. И., Дворецкий Д. П. Эндотелиальная гиперполяризация — новый путь модуляции сократительной функции лимфатических узлов 645
- ### XX. ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ
- 764 Шафикова Т. Н., Омеличкина Ю. В., Бояркина С. В., Еникеев А. Г., Максимова Л. А., Семёнов А. А. Обнаружение эндогенных фталатов у бактериальных патогенов растений и животных 121
- 768 Звездин А. О., Павлов Д. С., Кучерявый А. В., Цимбалов И. А. Циркадные ритмы и двигательная активность смолтов речной миноги *Lampetra fluviatilis* (L.) 243
- 772 Ковтун И. С., Ефимова М. В., Малофий М. К., Кузнецов В. В. Селективный свет регулирует устойчивость растений картофеля к хлоридному засолению 377
- Пасеков В. П. К анализу слабого двулокусного отбора по жизнеспособности и квазиравновесия по сцеплению 781

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 редколлекцией. 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 редколлекцией, 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, заверенным 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.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ*

- Абрамчук С. С., X, 4, 431
 Абузярова Н. Ф., I, 1, 7
 Авдеева В. В., X, 1, 41
 Азатян В. В., XI, 3, 312
 Алдошин С. М., X, 6, 698
 Алимов А. Р., I, 2, 131
 Аллилуева А. И., I, 2, 134
 Алымов М. И., XII, 1, 48; 2, 172; 4, 436; 6, 709
 Альмяшева О. В., XI, 6, 712
 Андреев А. А., XIV, 4, 468
 Анисимова И. В., XIV, 4, 468
 Анкудинов А. Б., XII, 1, 48; 4, 436
 Антонов В. Г., XVIII, 5, 629
 Антонюк Р. М., XIII, 1, 61
 Анфилогов В. Н., X, 5, 559
 Ань Ле Дык, XVII, 4, 487
 Аптекарев А. И., I, 6, 655
 Арашкевич Е. Г., XVII, 5, 619
 Ардентов А. А., I, 2, 138
 Архипов С. А., XVIII, 5, 624
 Атамась Е. И., IV, 5, 538
 Аутеншлюс А. И., XVIII, 5, 624
 Ахадов Т. А., XVIII, 2, 238
 Ашмарин А. А., XI, 2, 181
- Бабешко В. А., IX, 1, 29
 Бабешко О. М., IX, 1, 29
 Багаева А. А., XIII, 1, 71
 Бажин Н. М., XI, 1, 52
 Бажин П. М., XII, 6, 709
 Бакулин В. Н., IX, 1, 35
 Бакунина М. С., XVII, 4, 487
 Балакирев В. Ф., XI, 2, 177
 Баландин С. В., XVIII, 4, 491
 Бамбуров В. Г., X, 5, 554
 Барабанова А. И., X, 4, 431
 Барсков К. В., X, 6, 691
 Басов А. А., XVIII, 4, 498
 Бахтюков А. А., XVIII, 6, 760
 Бачурин С. О., XVIII, 1, 104
 Баянкина Т. М., XVI, 5, 615
 Белевич Т. А., XVII, 5, 619
 Белега Е. Д., I, 6, 659
 Белецкий А. В., XVIII, 3, 358
 Белогуб Е. В., XIII, 3, 320
 Беляева Ю. О., I, 6, 663
 Берберова Н. Т., X, 5, 568
 Берзин С. В., XIV, 3, 340
- Беркут А. А., XVIII, 1, 112
 Берлин А. А., X, 1, 41
 Бесов О. В., I, 3, 255
 Беспалов А. С., X, 5, 563
 Бетелин В. Б., II, 5, 532
 Бирюков А. А., XIII, 1, 66
 Благодатских И. В., X, 4, 431
 Богатов В. В., XIV, 2, 206
 Богомоллов Е. С., XIV, 4, 468
 Болотский И. Ю., XIII, 2, 184
 Болотский Ю. Л., XIII, 2, 184
 Болтнева Н. П., XVIII, 1, 104
 Больбасов Е. Н., XII, 6, 703
 Борзова О. В., XVII, 4, 487
 Борисов Ю. А., XI, 3, 307
 Бортников Н. С., XIII, 1, 71
 Ботвин В. В., XII, 6, 703
 Бочаров Э. В., XI, 3, 307
 Бочкова М. С., XVIII, 5, 637
 Бошнятов Б. В., XVII, 6, 755
 Бояркина С. В., XX, 1, 121
 Брусенцов И. И., XVIII, 5, 624
 Брюно А. Д., I, 3, 260
 Бугрова А. Е., XVIII, 3, 367
 Будунова К. А., III, 4, 405
 Будяк А. Е., XIV, 3, 335; 4, 460; 4, 472
 Бузанов Г. А., X, 1, 41
 Бузник В. М., X, 5, 563; XII, 6, 703
 Бурлуцкий В. В., III, 6, 672
 Буртман В. С., XIII, 3, 316
 Бучнев И. Н., XIII, 3, 325
 Быков В. И., XI, 4, 441
 Быков И. М., XVIII, 6, 764
 Быковский Ф. А., IX, 5, 550
 Бяков А. С., XIII, 2, 187
- Вавилин В. А., XVIII, 5, 624
 Ваганова И. В., X, 5, 554
 Валяева О. В., XIV, 1, 82
 Ванг К.-Л., XIV, 3, 335
 Варфоломеев С. Д., XI, 4, 441; XVIII, 2, 238
 Василевский А. А., XVIII, 1, 112
 Васильева А. Д., XVIII, 3, 367
 Ватрушкина Е. В., XIII, 3, 329
 Ведерников Е. Ф., IX, 5, 550
 Ведерников И. Л., XIII, 2, 187
 Ведмидь Л. Б., XI, 2, 177
- Веливецкая Т. А., XIV, 4, 460
 Великославинский С. Д., XIV, 4, 468
 Вержбицкий В. Е., XIII, 3, 329
 Веселкин Н. П., XIX, 3, 372
 Веселовский Р. В., XIII, 2, 191
 Викентьев И. В., XIII, 3, 320
 Вильданова М. Ф., XI, 6, 712
 Вишневская Н. А., XIII, 2, 200
 Владыкина В. Е., I, 1, 12
 Водопьянов С. К., I, 2, 142
 Волков А. В., XIII, 1, 66
 Воробьева И. А., XV, 4, 478
 Воронин В. И., X, 5, 554
 Воропаев С. А., VII, 6, 686
 Воротынцев М. А., X, 3, 294
 Вохминцев А. В., III, 6, 672
 Высоцкий С. И., XIII, 6, 721
- Гаврилов В. А., XV, 6, 745
 Гавричев К. С., XI, 2, 181
 Гавриш А. В., XIII, 1, 71
 Газатова Н. Д., XII, 6, 703
 Гайворонская Т. В., XVIII, 6, 764
 Галанкина О. Л., XIV, 3, 344
 Галкин В. А., II, 5, 532
 Ганелин А. В., XIII, 3, 329
 Ганиев С. Р., VI, 4, 410
 Гареев Б. И., XIV, 4, 472
 Гасников А. В., I, 6, 667
 Гедз А. М., XIII, 6, 716
 Георгиев Г. П., XVIII, 5, 633
 Георгиев П. Г., XVIII, 3, 363; 4, 495
 Гётце Ф., I, 3, 265
 Глазкова А. Т., X, 3, 294
 Глазов А. Л., IX, 3, 277
 Глебездина Н. С., XVIII, 2, 224
 Гнедовец А. Г., XII, 4, 436
 Гнучев Н. В., XVIII, 6, 777
 Гоева Л. В., X, 1, 41
 Голионко Б. Г., XIII, 3, 329
 Голованова А. В., XVIII, 5, 624
 Голубев Ю. Ф., IX, 3, 281
 Гончарова О. А., X, 3, 294
 Горбунов Э. А., I, 6, 667
 Горбунова О. Л., XVIII, 5, 641
 Горожанин В. М., XIV, 1, 77
 Горожанина Е. Н., XIV, 1, 77
 Гороховский Б. М., XIII, 3, 325

* Первое число — римская цифра — после фамилии автора и инициалов обозначает раздел по Тематическому указателю, второе — номер выпуска, третье — страницу.

- Горячев Н. А., XIII, 2, 187; XIV, 3, 335; 4, 460
 Гращенков Д. В., X, 5, 563
 Григорьев Т. Е., XVIII, 4, 498
 Григорьева Е. В., II, 1, 21
 Грушевский А. В., IX, 3, 281
 Губарева Е. А., XVIII, 4, 498; 6, 764
 Гудашева Т. А., XVIII, 2, 228
 Гуменюк И. С., XVIII, 4, 498
 Гурьянов В. Б., XIII, 6, 729
 Гусаров В. В., XI, 6, 712
 Гусейнов Ш. Л., X, 1, 44
 Гуськов В. Н., XI, 2, 181
- Дадаян А. К., XI, 3, 307
 Дарьин Д. В., XVIII, 6, 760
 Дворецкий Д. П., XIX, 5, 645
 Дегтярев К. Е., XIII, 1, 61; 5, 579
 Дедов А. Г., X, 3, 299
 Деева О. А., XVIII, 2, 228
 Делицын Л. М., XII, 5, 572
 Деркач К. В., XVIII, 6, 760
 Джмак С. С., XVIII, 4, 498; 6, 764
 Диеп Нгуен Ван, XVII, 4, 487
 Димитров В. М., XI, 2, 177
 Днестровский А. Ю., VII, 6, 686
 Донг Ман Дук, XVII, 4, 487
 Донская Т. В., XIII, 3, 325
 Дорофеева В. А., VII, 2, 150
 Дракон А. В., XI, 3, 312
 Дубинина Е. О., XVII, 3, 352
 Дубова Л. Г., XVIII, 1, 104
 Дудко О. В., IX, 5, 547
- Евдокимова О. В., IX, 1, 29
 Егоров Ю. Г., IX, 4, 415
 Егорова А. Н., I, 5, 519
 Егорова Ю. С., XIV, 3, 344
 Еникеев А. Г., XX, 1, 121
 Еремин А. В., XI, 3, 312
 Еремин Н. И., XIII, 3, 320
 Еремяшев В. Е., X, 5, 559
 Ерофеев В. Я., VI, 6, 682
 Ерохин М. М., XVIII, 3, 363; 4, 495
 Ерохин Ю. В., XIV, 3, 340
 Ефимова М. В., XX, 3, 377
- Жильцов К. Н., XVII, 6, 755
 Жимулев И. Ф., XVIII, 4, 507
 Жуковский М. Е., I, 5, 519
 Жураковский И. П., XVIII, 5, 624
- Завриев С. К., XVIII, 1, 109
 Заика В. А., XIII, 4, 455
 Зайцев А. В., XIX, 3, 372
- Заморина С. А., XVIII, 5, 637
 Занин А. А., X, 2, 167
 Захаров Ю. Д., XIII, 2, 187
 Зачепило Т. Г., XIX, 1, 117
 Звездин А. О., XX, 2, 243
 Зеленовский П. С., XIV, 2, 215
 Зеленский В. А., XII, 1, 48
 Зеленский В. А., XII, 4, 436
 Земнухов А. Л., XIII, 6, 716
 Зиновьев С. В., XIV, 2, 209
 Злобина Т. М., XV, 1, 87
 Золотарев Ю. А., XI, 3, 307
 Зубов Л. М., IX, 5, 542
 Зыкин Н. Н., XIV, 1, 82
 Зыкова Т. Ю., XVIII, 4, 507
- Ибрагимов И. А., I, 5, 523
 Иванов К. С., XIV, 3, 340
 Иванов П. О., XIII, 6, 716
 Иванова Л. А., XIV, 4, 464
 Ивашкин В. В., IX, 2, 161
 Ивашкин Ю. А., XII, 3, 303
 Ивлева Т. П., XII, 2, 172
 Игнатъев А. В., XIV, 4, 460
 Ильин А. В., IV, 5, 538
 Ильин Л. В., XVII, 5, 619
 Индейкина М. И., XVIII, 3, 367
 Индейцев Д. А., XI, 1, 56
 Исаенко С. И., XIV, 1, 82
- Кабанов М. В., VI, 6, 682
 Каде А. Х., XVIII, 6, 764
 Калинина Н. И., XIX, 3, 372
 Калинина Н. О., XVIII, 6, 772
 Карманова М. Б., I, 5, 527
 Карягина О. К., XI, 6, 712
 Каулина Т. В., XIII, 6, 725; XIV, 3, 344
 Качанова О. А., XVIII, 4, 498
 Кашаев А. А., XIV, 4, 464
 Кашенко С. А., II, 1, 21
 Кельманов А. В., I, 4, 387
 Киблер Э. В., XII, 6, 703
 Кириллов К. В., XV, 4, 482
 Кирпичников М. П., XVIII, 1, 112
 Киселев А. И., XIII, 5, 584
 Кислицын А. А., I, 4, 393
 Клименко В. В., VIII, 2, 156
 Ключевский А. В., XV, 5, 610
 Кобелев М. М., XV, 1, 93
 Кобелева Е. А., XV, 1, 93
 Ковалев Д. А., I, 6, 667
 Ковалев Д. П., XV, 4, 482
 Ковалев И. Д., XII, 1, 48
 Ковалев П. Д., XV, 4, 482
- Ковалев С. Г., XIII, 6, 721
 Ковалев С. С., XIII, 6, 721
 Ковалёва Н. В., XVIII, 1, 104
 Ковач В. П., XIII, 3, 325; 4, 455; 6, 734
 Ковтун И. С., XX, 3, 377
 Когарко Л. Н., XIII, 2, 191
 Козерожец И. В., X, 1, 41
 Козлов П. С., XIV, 2, 209
 Козлов С. С., XI, 6, 712
 Козлова А. Б., I, 4, 393
 Кокряков В. Н., XVIII, 4, 491
 Колосов В. Н., XI, 4, 447
 Коляда М. Н., X, 5, 568
 Конев Д. В., X, 3, 294
 Коновалов Б. В., XIV, 5, 600
 Кононихин А. С., XVIII, 3, 367
 Константинова Г. В., XIII, 6, 725
 Коржинская В. С., XIV, 5, 595
 Корнев В. В., I, 1, 18
 Корсаков А. В., XIV, 2, 215
 Корсакова М. Б., I, 4, 393
 Корякин С. Л., X, 3, 294
 Корянов В. В., IX, 3, 281
 Коссова С. А., XVII, 3, 352
 Котельников А. Р., XIV, 5, 595
 Котельникова З. А., XIV, 5, 595
 Котов А. А., XV, 1, 87
 Котов А. Б., XIII, 1, 61; 3, 325; 4, 455; 5, 579; 6, 734
 Кочетков Р. А., XII, 1, 48
 Кочетов Н. А., XII, 1, 48
 Кочиева Е. З., XVIII, 3, 358
 Кравченко В. Ф., III, 4, 405
 Красильников П. М., XVIII, 2, 233
 Крашенинников С. В., XVIII, 4, 498
 Кречетников Р. В., IX, 3, 285
 Кривобородов Е. Г., X, 2, 167
 Кропанева М. Д., XVIII, 5, 637
 Крутецкая З. И., XVIII, 5, 629
 Крылов А. А., XIV, 2, 209
 Кудрявцева В. Л., XII, 6, 703
 Куевда Е. В., XVIII, 4, 498; 6, 764
 Кузнецов А. Б., XIII, 6, 725
 Кузнецов В. В., XX, 3, 377
 Кузнецов Н. Б., XIII, 2, 195; XIV, 1, 77
 Кузнецов Н. Т., X, 1, 41
 Кузнецов Ю. С., VI, 4, 410
 Кукулина Е. М., XVIII, 2, 224
 Кулаковский А. Л., XIII, 5, 589
 Кульков В. М., IX, 4, 415
 Кульчин Ю. Н., IX, 5, 547
 Кучерявый А. В., XX, 2, 243
 Кучин А. В., X, 5, 568

- Лан Аньци, IX, 2, 161
 Ландер А. В., XV, 6, 745
 Лапшина Л. С., X, 6, 698
 Ларина Л. Л., XI, 6, 712
 Латыпов А. Д., XII, 6, 703
 Лебедев А. С., X, 5, 559
 Лебедева Ю. М., XIV, 4, 468
 Левин Б. В., XIII, 6, 729; XV, 4, 482
 Легкодимов А. А., XVII, 4, 487
 Легута У. Г., XVIII, 6, 768
 Лизгина К. В., X, 3, 294
 Лисицын А. П., XIV, 5, 600
 Литвинова Л. С., XII, 6, 703
 Лиханов И. И., XIV, 2, 209
 Лиханова И. И., XIV, 6, 739
 Лобач-Жученко С. Б., XIII, 6, 725; XIV, 3, 344
 Лобковский Л. И., XV, 3, 348
 Лобов Г. И., XIX, 5, 645
 Локтев А. С., X, 3, 299
 Локшин Б. В., X, 4, 431
 Лопатин Д. В., XIII, 3, 325
 Лукашев Е. П., XVIII, 2, 233
 Лукьянов Б. С., X, 6, 698
 Лукьянова М. Б., X, 6, 698
 Лучицкая М. В., XIII, 3, 329
 Лысенко Е. В., XIV, 2, 206
 Люкманова Е. Н., XVIII, 1, 112
 Ляхович В. В., XVIII, 5, 624
- Мазо Г. Н., X, 3, 299
 Макаров В. В., XVIII, 6, 772
 Макарова А. О., V, 6, 678
 Макарова Н. И., X, 6, 698
 Макарова С. С., XVIII, 6, 772
 Максимова Л. А., XX, 1, 121
 Малинина Е. А., X, 1, 41
 Малофий М. К., XX, 3, 377
 Малышев С. А., X, 3, 299
 Манджиева Г. В., XIV, 4, 472
 Манжурцев А. В., XVIII, 2, 238
 Марданов А. В., XVIII, 3, 358
 Марин Ю. Б., XIV, 3, 344
 Марков В. Ф., X, 5, 554
 Маров М. Я., VII, 2, 150; 6, 686
 Маскаева Л. Н., X, 5, 554
 Маслов А. В., XIII, 2, 195
 Матвеев М. А., XIII, 5, 589
 Махаева Г. Ф., XVIII, 1, 104
 Махотенко А. В., XVIII, 6, 772
 Медведев В. Я., XIV, 4, 464
 Межуев Я. О., X, 2, 167
 Мельников А. В., III, 6, 672
 Мельницкая А. В., XVIII, 5, 629
 Меньшиков П. Е., XVIII, 2, 238
- Мешалкин В. П., XII, 3, 303
 Минкин В. И., X, 6, 698
 Минцев В. Б., X, 3, 294
 Миронов К. В., III, 6, 672
 Мирошников А. Ю., XVII, 3, 352
 Михайленко Д. С., XIV, 2, 215
 Михайлова А. В., XVIII, 3, 363; 4, 495
 Михайлова Н. В., XVI, 5, 615
 Моисеев И. И., X, 3, 299
 Моисеева Ю. А., X, 6, 691
 Молошаг В. П., XIII, 3, 320
 Мордвинова В. В., XV, 1, 93
 Морозов Е. В., X, 5, 563
 Морозов Н. Ф., IX, 3, 277
 Морозов Ю. А., XIII, 5, 589
 Морозова Ю. В., XV, 6, 745
 Мохаммед А. А. М., I, 6, 667
 Муратиков К. Л., IX, 3, 277
 Мурашов К. Ю., XIII, 1, 66; XV, 1, 87
 Муровец В. О., XIX, 1, 117
 Мышкин М. Ю., XVIII, 1, 112
 Мясникова В. В., XVIII, 6, 764
 Мясоєдов Н. Ф., XI, 3, 307
- Нагаев И. Ю., XI, 3, 307
 Нам Буи Ван, XVII, 4, 487
 Насибов Ш. М., I, 2, 147
 Наумов А. А., I, 3, 265
 Нго Х. К., XIV, 2, 206
 Некрасова И. В., XVIII, 2, 224; 5, 641
 Немировская И. А., XIV, 5, 600
 Никаноров А. М., XVI, 6, 750
 Никитин Н. В., IX, 4, 420
 Никитина М. А., XII, 3, 303
 Николаев Е. Н., XVIII, 3, 367
 Никольская А. Б., XI, 6, 712
 Новоторцев В. М., XI, 2, 181
 Ноздрачев А. Д., XVIII, 5, 629
 Нокс П. П., XVIII, 2, 233
 Нурмухамедова Э. К.-А., XVIII, 4, 491
- Обжиров А. И., XVII, 4, 487
 Овсянников В. Г., XVIII, 6, 764
 Овчинников Р. О., XIII, 6, 734
 Овчинникова Т. В., XVIII, 4, 491
 Округин А. В., XIII, 6, 716
 Окулов А. К., XVII, 4, 487
 Олина А. А., XVIII, 2, 224
 Омеличкина Ю. В., XX, 1, 121
 Онегина В. Д., XIV, 5, 600
 Орлов В. М., XI, 4, 447
- Орлов Ю. Н., I, 4, 393
 Орлова Е. Г., XVIII, 5, 641
 Осадчий И. С., XVIII, 4, 507
 Осипова В. П., X, 5, 568
 Осипова Е. В., XI, 1, 56
 Остапенко В. В., IX, 4, 426
- Паверман В. И., XIV, 1, 77
 Павленко О. В., XV, 1, 98
 Павлов Д. С., XX, 2, 243
 Павлова А. В., IX, 1, 29
 Павлюченко И. И., XVIII, 6, 764
 Пальянова Г. А., XIII, 1, 71
 Пантеев А. С., XVIII, 2, 228
 Пармон В. Н., XI, 1, 52; 4, 451
 Пасеков В. П., XX, 6, 781
 Певцов Е. Ф., V, 6, 678
 Пеньёр С., XVIII, 1, 112
 Перегудов А. С., X, 4, 431
 Петров В. А., XV, 1, 87
 Петров Е. В., XII, 1, 48
 Петрушков Б. С., XIII, 1, 71
 Пиманов В. О., IX, 4, 420
 Пипко И. И., X, 6, 691
 Пирязев А. А., X, 3, 294
 Плоткина Ю. В., XIII, 3, 325; XIV, 4, 468
 Покатилов В. В., V, 6, 678
 Покатилов В. С., V, 6, 678
 Половинкина М. А., X, 5, 568
 Пономарева А. В., XVII, 4, 487
 Попеленская Н. В., IX, 4, 420
 Попов Е. Л., IX, 5, 550
 Похолкова Г. В., XVIII, 4, 507
 Прияткина Н. С., XIII, 2, 195
 Прозорова Л. А., XIV, 2, 206
 Проскура А. В., XVIII, 5, 624
 Проскурнин В. Ф., XIII, 1, 71
 Пугач С. П., X, 6, 691
 Пугачев А. Д., X, 6, 698
 Пустовойт В. И., III, 4, 405
 Пучков В. Н., XIII, 6, 721; XIV, 1, 77
 Пяткин А. В., I, 4, 387
- Равин Н. В., XVIII, 3, 358
 Рагозина В. Е., IX, 5, 547
 Раев М. Б., XVIII, 5, 637
 Рамазанов М. М., XV, 3, 348
 Рекославская Н. И., XVIII, 4, 503
 Репина И. А., X, 6, 691
 Решмин С. А., IX, 3, 289
 Рогожин Е. А., XVIII, 1, 109
 Розенталь О. М., XIV, 5, 605
 Розенфельд М. А., XVIII, 3, 367
 Романов В. Г., I, 3, 269

- Романова Е. А., XVIII, 6, 777
 Романюк Т. В., XIII, 2, 195; XIV, 1, 77
 Ронкин Ю. Л., XIV, 3, 340
 Ростовцева И. А., X, 6, 698
 Рубин А. Б., XVIII, 2, 233
 Рубцов Н. М., XII, 1, 48; 2, 172
 Рудакова Е. В., XVIII, 1, 104
 Рудько С. В., XIII, 2, 195
 Рундквист Д. В., XIII, 2, 200
 Русол А. В., VII, 2, 150
 Рыбина И. В., XVIII, 2, 228
 Рыков Ю. Г., I, 6, 655
 Рыцк Е. Ю., XIV, 4, 468
 Рязанцев Д. Ю., XVIII, 1, 109
- Савичев О. Г., X, 6, 691
 Савко К. А., XIV, 6, 739
 Савко К. А., XIV, 2, 209
 Садасюк А. С., XIV, 4, 472
 Сазонов Е. Г., XI, 2, 181
 Сальникова Е. Б., XIII, 5, 579; 6, 734; XIV, 4, 468
 Салаев Р. К., XVIII, 4, 503
 Самсонов А. Н., IX, 5, 550
 Сасорова Е. В., XIII, 6, 729
 Сачков Ю. Л., I, 2, 138
 Сашенко Л. П., XVIII, 6, 777
 Сейфуллина Н. Х., XVIII, 2, 233
 Семенова Н. А., XI, 4, 441; XVIII, 2, 238
 Семилетов И. П., X, 6, 691
 Семёнов А. А., XX, 1, 121
 Сеплярский Б. С., XII, 1, 48; 2, 172
 Сергеев С. А., XIV, 3, 344
 Сергеева Н. Д., XIV, 1, 77
 Сергиенко В. И., X, 6, 691
 Серединин С. Б., XVIII, 2, 228
 Сигов А. С., V, 6, 678
 Сидоренко А. Н., XVIII, 6, 764
 Сидоров А. А., XIII, 1, 66
 Сидоров С. В., XVIII, 5, 624
 Сизов А. А., XVI, 5, 615
 Скачкова В. К., X, 1, 41
 Скляр Е. В., XIII, 3, 325
 Сковитина Т. М., XIII, 3, 325
 Скрябин К. Г., XVIII, 3, 358
 Скубачевский А. Л., I, 6, 663
 Скублов С. Г., XIV, 3, 344
 Скузоватов С. Ю., XIV, 3, 335
 Смирнов А. Н., XVIII, 1, 109
 Смородина Н. В., I, 5, 523
 Смурская А. И., XIII, 5, 589
 Снегирь Е. А., XVIII, 6, 772
 Созонтов Е. А., XIX, 1, 117
- Сокерин М. Ю., XIV, 1, 82
 Сокерина Н. В., XIV, 1, 82
 Соколов С. Д., XIII, 3, 329
 Соловьев А. А., XV, 4, 478
 Сорокин А. А., XIII, 4, 455; 6, 734
 Сорокин А. Г., XV, 5, 610
 Сорокин А. П., XIII, 2, 184; 4, 455; 6, 734
 Сошникова Н. В., XVIII, 5, 633
 Степин С. А., I, 4, 397
 Столбиков А. С., XVIII, 4, 503
 Столин А. М., XII, 6, 709
 Стороженко П. А., X, 1, 44
 Студеникина А. А., XVIII, 5, 624
 Сук Н. И., XIV, 5, 595
 Супрунова Т. П., XVIII, 6, 772
 Сухов А. В., X, 1, 44
 Сухоруков Б. Л., XVI, 6, 750
 Сырбу Н. С., XVII, 4, 487
- Тагаев А. А., XVIII, 4, 491
 Тальянский М. Э., XVIII, 6, 772
 Тарасова Н. П., X, 2, 167
 Тарасова Ю. И., XIV, 3, 335; 4, 460
 Татарский Е. В., XVIII, 5, 633
 Твердохлебов С. И., XII, 6, 703
 Телятников И. С., IX, 1, 29
 Терентьев В. В., IX, 4, 415
 Тимганова В. П., XVIII, 5, 637
 Титгат Я., XVIII, 1, 112
 Тихомиров А. Н., I, 3, 265
 Тихонова Т. А., XVIII, 6, 768
 Ткачев А. В., XIII, 2, 200
 Ткачев В. В., X, 6, 698
 Толмачева Е. В., XIII, 3, 325
 Тран Т. Т., XIV, 2, 206
 Третьяков А. А., XIII, 1, 61; 5, 579
 Трофимов Е. А., X, 5, 559
 Трубников Д. Н., I, 6, 659
 Трынкова Д. С., XV, 1, 93
 Турутанов Е. Х., XV, 1, 93
 Тучин А. Г., IX, 3, 281
 Тучин Д. А., IX, 3, 281
- Ублинский М. В., XVIII, 2, 238
 Умнякова Е. С., XVIII, 4, 491
 Ушаковская З. Ф., XIV, 4, 464
- Фаддеев М. М., I, 5, 523
 Федоренко А. Г., IX, 1, 29
 Федоров С. Г., X, 1, 44
 Федорова О. М., XI, 2, 177
 Федосеенко А. М., XIV, 4, 468
 Федотова Е. В., VIII, 2, 156
 Фельдман Г. М., I, 3, 273
- Филиюшин М. А., XVIII, 3, 358
 Финкина Е. И., XVIII, 4, 491
 Фирсюк С. О., IX, 4, 415
 Флинт М. В., XVII, 3, 352; 5, 619
 Фомичев В. В., IV, 5, 538
 Фуфаев В. В., I, 4, 397
- Хандеев В. И., I, 4, 387
 Хиллер В. В., XIV, 3, 340
 Хлусов И. А., XII, 6, 703
 Хоанг Н. С., XIV, 2, 206
 Хомич В. Ю., V, 1, 26
 Хорачек М., XIII, 2, 187
 Хорошилов А. В., XI, 2, 181
 Хорошко В. А., XVIII, 4, 507
 Хохлов А. Р., X, 4, 431
 Храмцов П. В., XVIII, 5, 637
 Хритова М. А., XV, 1, 93
 Хромов А. В., XVIII, 6, 772
 Хромов А. П., I, 1, 18
 Худолей А. К., XIII, 2, 195
 Хынг Зыонг Куок, XVII, 4, 487
- Цветков В. О., XVIII, 1, 109
 Цимбалов И. А., XX, 2, 243
 Цыбенкова С. Б., XI, 4, 441
 Цыдыпов Л. Р., XV, 1, 93
 Цымбалов О. В., XVIII, 6, 764
- Чашечкин Ю. Д., XIV, 5, 605
 Чвалун С. Н., XVIII, 4, 498
 Чекуров К. Е., X, 4, 431
 Чернова Е. Н., XIV, 2, 206
 Черноусова Е. О., I, 6, 667
 Чернышев И. В., XIV, 4, 472
 Чесноков В. В., XI, 4, 451
 Четверина Д. А., XVIII, 3, 363; 4, 495
 Чижигов А. П., XII, 6, 709
 Чичкань А. С., XI, 4, 451
 Чойнзонов Е. Л., XII, 6, 703
 Чугаев А. В., XIV, 4, 472
 Чукичева И. Ю., X, 5, 568
- Шакиров Р. Б., XVII, 4, 487
 Шакирова М. В., XVII, 4, 487
 Шанина С. Н., XIV, 1, 82
 Шаповалов Ю. Б., XIV, 5, 595
 Шарапова Т. Н., XVIII, 6, 777
 Шаулов А. Ю., X, 1, 41
 Шафаревич А. И., I, 2, 134
 Шафикова Т. Н., XX, 1, 121
 Шахова Н. Е., X, 6, 691
 Шацилло А. В., XIII, 2, 195
 Шашков Д. И., XVIII, 6, 764
 Швеиц В. И., XVIII, 4, 491

Шебалин П. Н., XV, 4, 478
Шевалеевский О. И., XI, 6, 712
Шевцов П. Н., XVIII, 1, 104
Шевцова Е. Ф., XVIII, 1, 104
Шемяков А. О., IX, 4, 415
Шенкарев З. О., XVIII, 1, 112
Шилов Г. В., X, 6, 698
Ширшев С. В., XVIII, 5, 641
Шкаликов А. А., I, 1, 12
Шляхтин О. А., X, 3, 299
Шмаков В. А., V, 1, 26
Шмырков О. В., VI, 4, 410

Шпаков А. О., XVIII, 6, 760
Шпара А. П., X, 1, 44
Шулепко М. А., XVIII, 1, 112
Шумова О. А., X, 5, 568

Щенникова А. В., XVIII, 3, 358
Щепетова О. В., XIV, 2, 215
Щепин Е. В., I, 2, 131
Щукин А. С., XII, 1, 48

Юрина Л. В., XVIII, 3, 367
Юрченко А. В., XIV, 3, 344

Юсупова И. Ф., XIV, 2, 220

Ягодников Д. А., X, 1, 44
Яковлев П. А., I, 4, 401
Якубович О. В., XIII, 6, 716
Яркова М. А., XVIII, 2, 228
Ярмолук В. В., XIII, 5, 584; 6, 729;
XIV, 4, 468
Яруллина Л. Г., XVIII, 1, 109
Яшин Д. В., XVIII, 6, 777