

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский  
регион*

---

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2016

3

## Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

### Главная редакция:

В.И. Колесников (главный редактор),  
В.Е. Закруткин, В.С. Золотарев, А.В. Павленко (заместители главного редактора),  
Е.А. Шинкаренко (отв. секретарь)

### Редакционный совет:

В.А. Бабешко, Б.С. Карамурзов, В.И. Колесников, Ю.Ф. Коробейник, А.Г. Кусраев,  
В.Г. Лобанов, Г.Г. Матишов, В.И. Минкин, М.Х. Рабаданов, Э.З. Эмирбеков

### Редакционная коллегия:

В.Е. Закруткин – председатель редколлегии (д. г.-м.н., проф.), В.Н. Труфанов – зам. пред. редколлегии (д.г.-м.н., проф.), А.В. Абанин (д.ф.-м.н., проф.), Н.И. Бойко (д. г.-м.н., проф.), В.В. Внуков (д.б.н., проф.), Л.С. Ворович (к.ф.-м.н., доц.), Ю.М. Гуфан (д.ф.-м.н., проф.), О.Н. Демина (д.б.н.), А.Г. Захаров (д.техн.н., проф.), Л.М. Зубов (д.ф.-м.н., проф.), Я.М. Ерусалимский (к.ф.-м.н., д.техн.н., проф.), М.И. Карякин (д.ф.-м.н., доц.), С.Б. Климентов (д.ф.-м.н., проф.), С.И. Колесников (к.г.н., д.с.-х.н., проф.), Г.В. Куповых (д.ф.-м.н., проф.), С.В. Курбатов (д.х.н., проф.), А.М. Лерер (д.ф.-м.н., проф.), В.А. Миноранский (д.с.-х.н., проф.), В.В. Онищенко (д.г.н., проф.), А.Ф. Пожарский (д.х.н., проф.), Э.С. Сианисян (д. г.-м.н., проф.), З.А. Темердашев (д.х.н., проф.), Ю.А. Устинов (д.ф.-м.н., проф.), Ю.А. Федоров (д.г.н., проф.), А.Д. Хаванский (к. г.-м.н., д.г.н., проф.), С.П. Чернышева (к.ф.-м.н., доц.), О.М. Шабанов (д.х.н., проф.)

### Учредители:

Министерство образования и науки Российской Федерации, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет, Кубанский государственный университет, Пятигорский государственный лингвистический университет, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростовский государственный экономический университет, Северо-Осетинский государственный университет, Северо-Кавказский федеральный университет, Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова, Южно-Российский институт управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Южный федеральный университет

Над номером работали: Л.С. Ворович, В.И. Литвиненко, С.П. Чернышева, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко.

Подписано в печать 26.09.2016 г.  
Формат 60×84/8. Гарнитура "Таймс".  
Усл. печ.л. 13,48. Уч.-изд. л. 15,04.  
Тираж 200 экз. Заказ № 5218.

**Адрес редакции и издателя (для переписки):**  
**344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,**  
**ЮФУ, журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион»**  
**Е-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru)**  
**Адрес в Интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)**

Адрес редколлегии серии «Естественные науки»: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110,  
тел.: (863) 218-40-00 доб. 11-093; (863) 218-40-00 доб. 11-094.

Адрес типографии: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к. 104.  
Издательско-полиграфический комплекс КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

Регистрационный номер 011019  
Комитета Российской Федерации по печати  
Научно-образовательный и прикладной журнал  
Издается с 1973 г.  
Периодичность серии 4 номера в год  
№ 3 (191) 2016 г.

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

---

### СОДЕРЖАНИЕ

<b>ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ</b>	<i>Азаров Д.А., Зубов Л.М.</i> Механико-геометрическое моделирование в нелинейной теории упругости.....	5
	<i>Казарников А.В., Ревина С.В.</i> Асимптотика стационарных решений системы Рэлея с диффузией.....	13
	<i>Орлова Н.С., Волик М.В.</i> Математическое моделирование движения обвалов с использованием континуального подхода.....	20
	<i>Шубарин М.А.</i> Интерполяционные и комбинаторные свойства некоторых классов степенных пространств Кёте.....	25
<b>БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ</b>	<i>Аллилуев И.А., Вечканов Е.М., Сорокина И.А., Калюжная Ю.Н., Внуков В.В.</i> Свободнорадикальные процессы и антиоксидантный статус у <i>Rattus norvegicus</i> при сочетанном влиянии травмы и модельной гипергомоцистеинемии.....	31
	<i>Мамедова А.Д., Алиев Р.Т.</i> Изучение активности синтеза нуклеиновых кислот при гетерозисе и стимуляции ростовых процессов, вызываемых действием гидразида малеиновой кислоты.....	36
	<i>Матишов Г.Г., Пономарева Е.Н., Казарникова А.В., Ильина Л.П., Григорьев В.А., Соколова Т.А., Польшина Т.Н., Коваленко М.В., Кузов А.А., Корчунов А.А.</i> Инновационная биотехнология получения экологически чистой продукции аквабиокультуры в модульной установке замкнутого водоснабжения.....	41
<b>НАУКИ О ЗЕМЛЕ</b>	<i>Бузмаков С.А., Дзюба Е.А.</i> Определение фонового содержания циклических элементов в почвах Тулымского Камня (Пермский край).....	49
	<i>Дружинин А.Г., Лачининский С.С., Краснов А.И., Сорокин И.С.</i> Поляризация системы расселения в приморской зоне Ленинградской области в 1989–2015 годах.....	58
	<i>Закруткин В.Е., Гибков Е.В.</i> Техногенные геохимические потоки угледобывающих территорий и их влияние на окружающую среду (на примере Донецкого бассейна).....	66
	<i>Кондратьева Н.В., Гегиев К.А., Анаев М.Т., Куповых Г.В.</i> Селевая опасность Восточного Кавказа.....	72
	<i>Куповых Г.В., Дахова О.О., Хучунаев Б.М.</i> Применение расчетного мониторинга атмосферного воздуха городских экосистем.....	76
<i>Самойленко И.Ю., Сианисян Э.С.</i> Использование исторического и палеотектонического анализа оценки газоносности Ейской площади Краснодарского края.....	80	

<i>Трофимов И.Л., Канониди Х.Д.</i> Применение комплексных векторов при изучении временных рядов геомагнитных вариаций.....	87
<i>Федоров Ю.А., Доценко И.В., Дмитрик Л.Ю.</i> Железо в поверхностных и подземных водах бассейна Азовского моря.....	91
<i>Чендев Ю.Г., Петин А.Н., Березуцкий В.Д., Долгих А.В., Белеванцев В.Г., Дудин Д.И.</i> Голоценовые сигналы гумидизации климата в профилях разновозрастных черноземов центра Восточной Европы.....	100
<i>Шишкина Д.Ю., Белая Т.Г.</i> Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова Октябрьского района Ростова-на-Дону.....	110

# IZVESTIYA VUZOV. SEVERO-KAVKAZSKII REGION

*Reg. No. 011019  
Of the Committee of the Press of the Russian Federation  
Scientifically-educational and applied magazine  
Was founded in 1973.  
Period is 4 numbers per a year  
№ 3 (191) 2016.*

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3

## NATURAL SCIENCE

---

### CONTENTS

<b>PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES</b>	<i>Azarov D.A., Zubov L.M.</i> Mechanical-Geometrical Modelling in Non-Linear Theory of Elasticity.....	5
	<i>Kazarnikov A.V., Revina S.V.</i> Asymptotics of Stationary Solutions of Rayleigh Reaction-Diffusion System.....	13
	<i>Orlova N.S., Volik M.V.</i> Mathematical Modeling of Rockfall Using the Continuum Approach.....	20
	<i>Shubarin M.A.</i> Interpolational and Combinatorial Properties of Köthe Power Spaces.....	25
<b>BIOLOGICAL SCIENCE</b>	<i>Alliluev I.A., Vechkanov E.M., Sorokina I.A., Kalyuzhnaya Yu.N., Vnukov V.V.</i> Free Radical Processes and Antioxidant Status Rattus Norvegicus in Combined Effect of Injuries and Model Hyperhomocysteinemia.....	31
	<i>Mamedova A.D., Aliev R.T.</i> Study of Nucleic Acids Synthesis Activity in Heterosis and Stimulate Growth Processes Induced by Action of Maleic Hydrazide .....	36
	<i>Matishov G.G., Ponomareva E.N., Kazarnikova A.V., Il'ina L.P., Grigor'ev V.A., Sokolova T.A., Pol'shina T.N., Kovalenko M.V., Kuzov A.A., Korchunov A.A.</i> Aquabiocultural Innovative Biotechnology for Organic Products Rearing in Recirculation System Module.....	41
<b>SCIENCE OF EARTH</b>	<i>Buzmakov S.A., Dzyuba E.A.</i> Evaluation of Background Regular Elements Content in Soils of Tulym Rock (Perm Region).....	49
	<i>Druzhinin A.G., Lachininskii S.S., Krasnov A.I., Sorokin I.S.</i> The Polarization of System Moving in the Coastal Zone of the Leningrad Region in 1989–2015.....	58
	<i>Zakrutkin V.E., Gibkov E.V.</i> Technogenic Geochemical Flows of Coal-Mining Areas and Their Impact on the Environment (for Example, the Donets Basin).....	66
	<i>Kondratyeva N.V., Gegiev K.A., Anaev M.T., Kupovykh G.V.</i> Debris Flow Hazard of Eastern Caucasus.....	72
	<i>Kupovkh G.V., Dakhova O.O., Khuchunaev B.M.</i> Application of Settlement Monitoring of Urban Ecosystems Outside.....	76
	<i>Samoilenko I.Yu., Sianisyan E.S.</i> The Use of Historical and Paleotectonic Analysis of Gas-Bearing Capacity Assessment of the Yeysk Area of the Krasnodar Region.....	80

<b>Trofimov I.L., Kanonidi Kh.D.</b> The Use of Complex Vectors in the Study of Time Series of Geomagnetic Variations.....	87
<b>Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Dmitrik L.Yu.</b> Iron in Surface and Underground Water Basin the Sea of Azov.....	91
<b>Chendev Yu.G., Petin A.N., Berezutskii V.D., Dolgikh A.V., Belevantsev V.G., Dudin D.I.</b> Holocene Signals of Climatic Humidity in Chernozem Soils of Different Historical Periods within Center of Eastern Europe.....	100
<b>Shishkina D.Yu., Belaya T.G.</b> Ecological and Geochemical Assessment of the Topsoil of the Oktyabr District of Rostov-on-Don.....	110

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 539.3

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-5-12

**МЕХАНИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ**

© 2016 г. Д.А. Азаров, Л.М. Зубов

Азаров Даниил Анатольевич – старший преподаватель, Донской государственной технической университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, e-mail: danila\_az@mail.ru

Azarov Daniil Anatolievich – Senior Lecturer, Don State Technical University, Gagarin Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: danila\_az@mail.ru

Зубов Леонид Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: zubovl@yandex.ru

Zubov Leonid Mikhailovich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science of the Southern Federal University, Milchakov St., 8a, 344090, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: zubovl@yandex.ru

*Изложен новый способ построения определяющих соотношений упругого материала при больших деформациях, который можно назвать механико-геометрическим моделированием. Этот способ существенно отличается от распространенного формально-аналитического метода, основанного на полиномиальной аппроксимации удельной энергии как функции тензора деформации. Предложенный подход применен к построению конкретной модели изотропного нелинейно-упругого материала. Проведен анализ свойств полученной потенциальной энергии деформации материала.*

**Ключевые слова:** нелинейная упругость, механико-геометрическая модель, потенциальная энергия деформации.

*A new approach is proposed concerning the construction of constitutive relations of the elastic material under large deformations, which can be described as mechanical-geometrical. This approach significantly differs from the formal analytical method being based on polynomial approximation of the specific energy as the strain tensor's function. The approach is applied to the construction of the concrete model of an isotropic elastic media. The properties' analysis of the potential stress energy was carried out.*

**Keywords:** non-linear elasticity, mechanical-geometrical model, specific strain energy.

В нелинейной теории упругости построение уравнений состояния в основном заключается в аналитическом представлении удельной потенциальной энергии деформации как функции инвариантов какого-либо из тензоров деформации. Полиномиальные представления этой функции дают разнообразные выражения энергии [1]. Далее встают вопросы о правомерности такого представления, согласовании его с естественными ограничениями теории упругости, нахождении параметров модели и т.д. Такой формально-аналитический метод обладает определенными достоинствами, но имеет слабую физическую обоснованность. В работе предложен другой подход к построению функции энергии деформации.

**Общие положения модели**

Главная идея этого подхода заключается в конструировании геометрической модели, которая до-

полнена моделью силовых (механических) взаимодействий в упругой системе [2–5]. Из полученной системы уравнений напряжения-деформации выводится функция потенциальной энергии деформирования. Этот метод кажется более обоснованным в связи с исходной физической непротиворечивостью используемых допущений модели.

Модель представляет собой набор упругих связей, объединенных определенным способом в пространственную геометрическую конструкцию (рис. 1).

Каждую связь будем считать линейно-упругим стержнем (пружиной), работающим на растяжение-сжатие без потери устойчивости. В применении модели к механике сплошных сред связи должны отражать феноменологические оценки интегральных характеристик взаимодействий между гранями элементарного объема сплошной среды. Стержни модели могут быть двух типов: продольные и диагональные. Продольные соединяют противолежащие грани параллелепипеда,

диагональные – его смежные грани. Будем исследовать деформацию описанной конструкции под действием сосредоточенных сил, параллельных ребрам параллелепипеда и приложенных в центрах его граней. Таким образом, продольные связи передают деформацию «вдоль» каждой из соответствующих осей, по которым действуют нагрузки (растягивающие или сжимающие силы). Что касается диагональных связей, то они связывают продольные и поперечные деформации и определяют функцию поперечной деформации модели (в линейной теории упругости – коэффициент Пуассона).

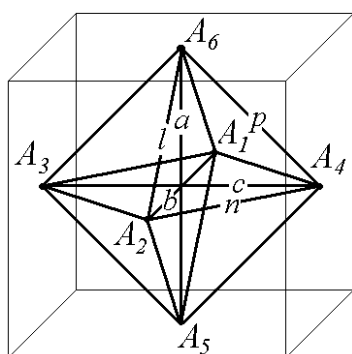


Рис. 1. Общий вид модели. Геометрия связей

В принципе каждая связь может быть представлена в виде распространенных в механике сплошных сред простых одномерных моделей типа упругого элемента, вязкого элемента, элемента сухого трения и их комбинаций [6].

В данной работе ограничимся случаем линейно-упругих связей. Даже в таком упрощенном варианте модель демонстрирует существенно нелинейное поведение. Модель можно обобщить, выбирая другие зависимости «сила – растяжение», например квадратичную [3]. Другой альтернативой для расширения возможности модели является замена упругого элемента вязкоупругим, например стандартным линейным телом – моделью Зинера [5].

Поведение упругой сплошной среды при деформировании будем определять по изменению размеров и формы каждой грани параллелепипеда, обусловленному приложением внешних сил. Взаимодействия между гранями описываются с помощью системы связей, встроенной в элементарный объем механической конструкции (рис. 1), узлы которой шарнирно прикреплены к центрам граней (узлы  $A_1 - A_6$ ). В такой системе растяжение или сжатие какой-либо связи повлечет за собой изменение длин других связей и, в свою очередь, рас-

стояний между гранями или же изменение углов между ними.

Характеристики конструкции можно разделить на два типа: геометрические и механические. Геометрические характеристики – это длины связей и углы, а механические – параметры упругости (или, возможно, вязкости, пластичности) связей. В общем случае, если характеристики связей различны, конструкция будет моделировать свойства анизотропной сплошной среды. Подробное исследование поведения таких моделей не входит в цели данной работы.

Что касается изотропного материала, то для его описания в модели достаточно указать только два типа характеристик жесткостей: первый – для всех связей между противоположными гранями, второй – для всех связей между смежными гранями.

### Уравнения модели для трехосного деформирования ортотропного тела

*Общие обозначения и вид модели.* Рассмотрим трехосное растяжение элементарного объема с заключенной в него моделью. Внешние силы, действующие по каждой из осей модели, обозначим  $F_a, F_b$  и  $F_c$ , реакцию каждой связи модели –  $R_i$ , где индекс  $i$  обозначает соответствующую связь  $i = a, b, c, l, n, p$ , удлинение каждой связи –  $\delta_i$ . Длины связей в недеформированном состоянии будем обозначать малыми буквами, а в деформированном – большими.

*Геометрия модели.* На рис. 1 представлена геометрия начального состояния модели. Геометрия после деформации на примере одного октанта представлена на рис. 2а. Длины продольных связей –  $a, b, c$ , диагональных –  $l, n, p$ . В недеформированном состоянии справедливы зависимости

$$l^2 = a^2 + b^2, \quad p^2 = a^2 + c^2, \quad n^2 = b^2 + c^2. \quad (1)$$

В деформированном состоянии выполняются равенства

$$L^2 = A^2 + B^2, \quad P^2 = A^2 + C^2, \quad N^2 = B^2 + C^2, \quad (2)$$

$$A = a + \delta_a, \quad B = b + \delta_b, \quad C = c + \delta_c,$$

$$L = l + \delta_l, \quad P = p + \delta_p, \quad N = n + \delta_n. \quad (3)$$

Из этих уравнений можно получить связь диагональных удлинений с продольными, т.е. с размерами элементарного объема. Для этого подставим (3) в (2). Тогда, с учетом (1), получаем уравнения для нахождения удлинений диагональных связей

$$\begin{aligned} \delta_l &= \sqrt{l^2 + q_l} - l, \quad \delta_p = \sqrt{p^2 + q_p} - p, \quad \delta_n = \\ &= \sqrt{n^2 + q_n} - n, \end{aligned} \quad (4)$$



где  $q_l = \delta_a^2 + 2a\delta_a + \delta_b^2 + 2b\delta_b$ ,

$q_p = \delta_a^2 + 2a\delta_a + \delta_c^2 + 2c\delta_c$ ,

$q_n = \delta_b^2 + 2b\delta_b + \delta_c^2 + 2c\delta_c$ ,

и углов между связями

$$\cos \phi = \frac{A}{L} = \frac{a + \delta_a}{l + \delta_l}, \quad \cos \psi = \frac{B}{N} = \frac{b + \delta_b}{n + \delta_n},$$

$$\cos \theta = \frac{A}{P} = \frac{a + \delta_a}{p + \delta_p}. \tag{5}$$

В недеформированном состоянии углы определяются формулами  $\cos \phi_0 = \frac{a}{l}$ ,  $\cos \psi_0 = \frac{b}{n}$ ,  $\cos \theta_0 = \frac{a}{p}$ .

*Механические характеристики модели.* Схема приложенных внешних сил и реакции связей показаны на рис. 2б.

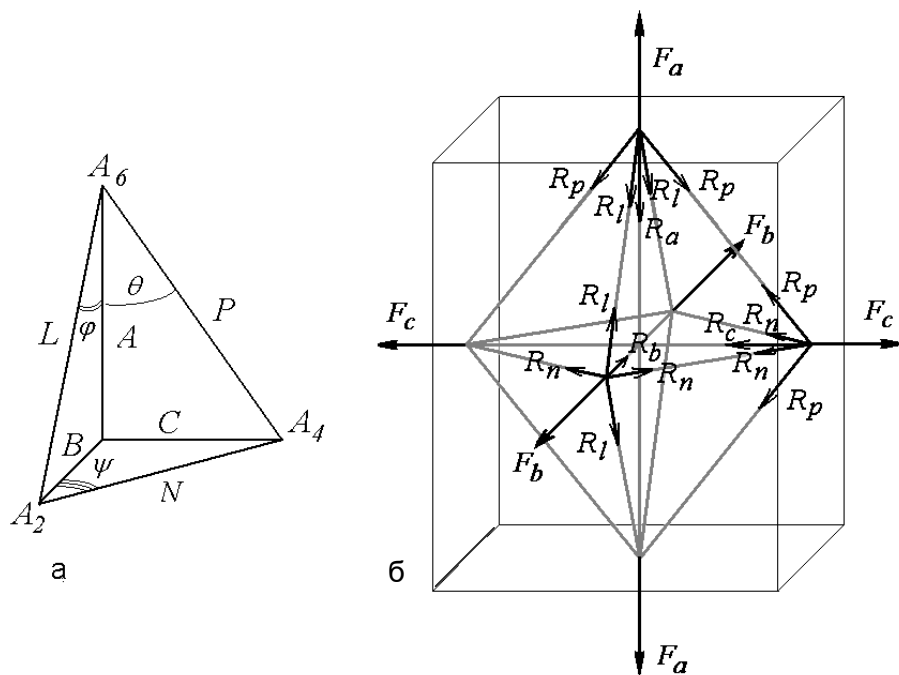


Рис. 2. Углы модели в актуальной конфигурации (а) и схема действия внешних сил и реакции связей (б)

Внешние силы и реакции связей модели подчиняются условиям равновесия сил в узлах:

$$\begin{cases} F_a = R_a + 2R_l \cos \phi + 2R_p \cos \theta, \\ F_b = R_b + 2R_l \sin \phi + 2R_n \cos \psi, \\ F_c = R_c + 2R_p \sin \theta + 2R_n \sin \psi. \end{cases} \tag{6}$$

В качестве зависимости силы реакции от удлинения связи выберем самую простую – линейный закон:  $R_i = k_i \delta_i$ ,  $i = a, b, c, l, p, n$ .

Здесь  $R_i$  – сила реакции  $i$ -й связи; параметр  $k_i$  – коэффициент упругости связи.

При помощи (5) и (6) найдем зависимости внешних сил от удлинений продольных связей, используя выражения (4) для удлинений диагональных связей. Таким образом, внешние силы выражаются только через три основных продольных удлинения  $\delta_a, \delta_b, \delta_c$ :

$$\begin{cases} F_a = k_a \delta_a + 2k_l (\sqrt{l^2 + q_l} - l) \frac{a + \delta_a}{\sqrt{l^2 + q_l}} + \\ + 2k_p (\sqrt{p^2 + q_p} - p) \frac{a + \delta_a}{\sqrt{p^2 + q_p}}, \\ F_b = k_b \delta_b + 2k_l (\sqrt{l^2 + q_l} - l) \frac{b + \delta_b}{\sqrt{l^2 + q_l}} + \\ + 2k_n (\sqrt{n^2 + q_n} - n) \frac{b + \delta_b}{\sqrt{n^2 + q_n}}, \\ F_c = k_c \delta_c + 2k_p (\sqrt{p^2 + q_p} - p) \frac{c + \delta_c}{\sqrt{p^2 + q_p}} + \\ + 2k_n (\sqrt{n^2 + q_n} - n) \frac{c + \delta_c}{\sqrt{n^2 + q_n}}. \end{cases} \tag{7}$$

Формулами удобнее пользоваться, если на основе (3) в них перейти вместо  $\delta_a, \delta_b, \delta_c$  к зависимостям от длин  $A, B$  и  $C$ . После такого перехода система уравнений примет вид

$$\begin{cases} F_a = A(k_a + 2k_l + 2k_p) - \\ -A \left( \frac{2lk_l}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \frac{2pk_p}{\sqrt{A^2 + C^2}} \right) - ak_a, \\ F_b = B(k_b + 2k_l + 2k_n) - \\ -B \left( \frac{2lk_l}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \frac{2nk_n}{\sqrt{B^2 + C^2}} \right) - bk_b, \\ F_c = C(k_c + 2k_n + 2k_p) - \\ -C \left( \frac{2nk_n}{\sqrt{B^2 + C^2}} + \frac{2pk_p}{\sqrt{A^2 + C^2}} \right) - ck_c. \end{cases} \quad (8)$$

Для элементарного объема рассчитаем нормальные напряжения на его гранях, поделив левые и правые части этих соотношений на площадь грани параллелепипеда в начальном состоянии  $\frac{F_a}{s_{bc}} = \frac{F_a}{4bc} = \sigma_a$ ,  $\frac{F_b}{s_{ac}} = \frac{F_b}{4ac} = \sigma_b$ ,  $\frac{F_c}{s_{ab}} = \frac{F_c}{4ab} = \sigma_c$ . Перейдем от размерных величин  $A, B, C$  к безразмерным кратностям удлинений:  $\lambda_A = \frac{A}{a}$ ,  $\lambda_B = \frac{B}{b}$ ,  $\lambda_C = \frac{C}{c}$ . В результате получим систему

$$\begin{cases} \sigma_a = \frac{1}{4bc} \left[ a \cdot \lambda_A (k_a + 2k_l + 2k_p) - a \cdot \lambda_A \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{2lk_l}{\sqrt{a^2 \cdot \lambda_A^2 + b^2 \cdot \lambda_B^2}} + \frac{2pk_p}{\sqrt{a^2 \cdot \lambda_A^2 + c^2 \cdot \lambda_C^2}} \right) - ak_a \right], \\ \sigma_b = \frac{1}{4ac} \left[ b \cdot \lambda_B (k_b + 2k_l + 2k_n) - b \cdot \lambda_B \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{2lk_l}{\sqrt{a^2 \cdot \lambda_A^2 + b^2 \cdot \lambda_B^2}} + \frac{2nk_n}{\sqrt{b^2 \cdot \lambda_B^2 + c^2 \cdot \lambda_C^2}} \right) - bk_b \right], \\ \sigma_c = \frac{1}{4ab} \left[ c \cdot \lambda_C (k_c + 2k_n + 2k_p) - c \cdot \lambda_C \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{2nk_n}{\sqrt{b^2 \cdot \lambda_B^2 + c^2 \cdot \lambda_C^2}} + \frac{2pk_p}{\sqrt{a^2 \cdot \lambda_A^2 + c^2 \cdot \lambda_C^2}} \right) - ck_c \right]. \end{cases} \quad (9)$$

Выражения (9) представляют собой инженерные (или номинальные) напряжения как функции главных кратностей удлинений при трехосном растяжении-сжатии ортотропного тела в виде определяющих соотношений механики сплошных сред в главных осях деформации. Главные кратности удлинений  $\lambda_i$  являются компонентами левого тензора растяжения  $\mathbf{U} = \lambda_A d_1 d_1 + \lambda_B d_2 d_2 + \lambda_C d_3 d_3$  [1].

Количество параметров в формулах (9) для потенциальной энергии ортотропной среды равно 9, из них шесть механических параметров – коэффициенты  $k_a, k_b, k_n, k_l, k_n, k_p$  и три геометрических –

углы модели  $\phi_0, \psi_0, \theta_0$  до деформации, присутствующие в формулах неявно через длины продольных связей  $a, b, c$ .

*Потенциальная энергия деформирования.* Потенциальную энергию деформирования  $\mathcal{E}$  определяем как функцию относительных удлинений  $\delta_a, \delta_b, \delta_c$ . Напряжения являются частными производными от этой энергии по соответствующим относительным удлинениям  $\delta_i$ .

$$\sigma_a = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \delta_a}; \quad \sigma_b = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \delta_b}; \quad \sigma_n = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \delta_n}. \quad (10)$$

В изотропном материале механические свойства поперечных и диагональных связей одинаковы  $k_a = k_b = k_n$ ,  $k_l = k_n = k_p$ . Геометрические характеристики до деформации определяются равенством углов  $\phi_0 = \psi_0 = \theta_0 = \frac{\pi}{4}$ . В этом случае без потери

общности можно считать  $a = b = c = 1$ ,  $l = p = n = \sqrt{2}$ .

Соотношения (10), записанные через главные кратности удлинений, имеют вид

$$\sigma_a = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \lambda_A}; \quad \sigma_b = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \lambda_B}; \quad \sigma_n = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \lambda_C},$$

где  $\mathcal{E}$  – энергия изотропного материала.

Восстановив по трем частным производным неизвестную функцию, получаем формулу потенциальной энергии изотропного материала:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & \frac{(k_a + 4k_l)}{8} (\lambda_A^2 + \lambda_B^2 + \lambda_C^2) - \frac{\sqrt{2}k_l}{2} \times \\ & \times (\sqrt{\lambda_A^2 + \lambda_B^2} + \sqrt{\lambda_A^2 + \lambda_C^2} + \sqrt{\lambda_B^2 + \lambda_C^2}) - \\ & - \frac{k_a}{2} (\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C) + K_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Константа  $K_0$  является постоянной интегрирования и может быть найдена из условия равенства нулю энергии при отсутствии деформации ( $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = 1$ ),

$$\mathcal{E}(1,1,1) = 0 \Rightarrow K_0 = \frac{3}{8}(k_a + 4k_l).$$

Выражение потенциальной энергии деформации (11) принимает окончательный вид

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & \frac{(k_a + 4k_l)}{8} (\lambda_A^2 + \lambda_B^2 + \lambda_C^2) - \frac{\sqrt{2}k_l}{2} \times \\ & \times (\sqrt{\lambda_A^2 + \lambda_B^2} + \sqrt{\lambda_A^2 + \lambda_C^2} + \sqrt{\lambda_B^2 + \lambda_C^2}) - \\ & - \frac{k_a}{2} (\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C) + \frac{3}{8}(k_a + 4k_l). \end{aligned} \quad (12)$$

Количество параметров в выражении (12) для потенциальной энергии изотропной среды равно двум. Это два механических параметра  $k_a, k_b$ .

Полученное методом механико-геометрического моделирования новое выражение (12) для удельной потенциальной энергии деформирования сжимаемого изотропного материала задает симметричную функцию кратностей главных удлинений. Явное представление этой функции через инварианты какого-либо из тензоров деформаций является весьма сложной задачей из-за радикалов, входящих в формулу энергии. Хотя первое и третье слагаемые легко выражаются через инварианты левого тензора растяжения  $U$ , второе слагаемое, содержащее радикалы, может быть выражено через эти инварианты только очень сложным образом, отчего формула для энергии теряет привлекательность простоты.

Для визуального отображения функции энергии введем безразмерный параметр  $k = \frac{k_a}{2k_l}$  и выполним

нормирование энергии  $\dot{Y} = \frac{\dot{Y}_E}{2k_l}$ . В результате получим формулу, которая зависит от одного параметра  $k$ :

$$\dot{Y} = \frac{(k+2)}{8}(\lambda_A^2 + \lambda_B^2 + \lambda_C^2) - \frac{k}{4}(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C) - \frac{\sqrt{2}}{4}(\sqrt{\lambda_A^2 + \lambda_B^2} + \sqrt{\lambda_A^2 + \lambda_C^2} + \sqrt{\lambda_B^2 + \lambda_C^2}) + \frac{3}{8}(k+2). \quad (13)$$

Энергия для линеаризованных уравнений состояния. Из выражения энергии (12) для изотропного материала  $\dot{Y}_E$  при инфинитезимальных деформациях  $\delta_a, \delta_b, \delta_c \ll 1$  следует формула для соответствующей энергии деформации

$$\tilde{Y}_E = \frac{(k_a + 4k_l)}{8}(\delta_a^2 + \delta_b^2 + \delta_c^2) + \frac{k_l}{4}(\delta_a\delta_b + \delta_a\delta_c + \delta_b\delta_c).$$

Выражение энергии в линейной теории упругости имеет вид [1]

$$A = \frac{1}{2}[(\lambda + 2\mu)(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + 2\lambda(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3)],$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные относительные удлинения;  $\lambda, \mu$  – постоянные Ляме.

Сравнивая между собой это представление и энергию модели, увидим, что параметры модели соответствуют постоянным Ляме в виде

$$\lambda = k_l/4; \quad \mu = (k_a + k_l)/8. \quad (14)$$

При этом коэффициент Пуассона

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + 2\mu)} = \frac{k_l}{k_a + 3 \cdot k_l}.$$

*Дополнительные неравенства теории упругости.*

Рассмотрим ограничения на параметры модели  $k$  и  $k_l$ , вытекающие из определяющих неравенств теории упругости. Приведем эти неравенства в их линейной

форме в соответствии с классификацией К. Труделла [7]. В линейной теории достаточно двух неравенств:

$$\text{O-F: } \mu > 0, \quad \text{P-C: } 3\lambda + 2\mu > 0. \quad (15)$$

Неравенство O-F (ordered forces) является требованием положительности модуля сдвига  $\mu$ , неравенство P-C (pressure-compression) – модуля объемного деформирования  $K$ .

В терминах предлагаемой модели из этих неравенств с учетом формул (14) получим ограничение на значения параметров модели:  $k_a > -k_l$ .

Параметр  $k_a$  может быть отрицательным, но при этом  $k_l > 0$ , так как  $k_l = 4\lambda$  и  $\lambda > 0$  (модель не предназначена для описания свойств материалов-ауксетиков).

Ограничение на коэффициент  $k = k_a/2k_l$  принимает вид  $k > -0,5$ .

Предельное значение  $k = -0,5$  соответствует коэффициенту Пуассона  $\nu = 1/2$ , а  $k = 0$  –  $\nu = 1/3$ .

Далее исследованы два основных случая безразмерного параметра модели:  $-0,5 < k < 0$  и  $k \geq 0$ .

### Свойства функции потенциальной энергии

Рассмотрим свойства полученной функции энергии изотропной среды (13) при  $k \geq 0$ . Такие значения параметра  $k$  соответствуют значениям коэффициента Пуассона материала при инфинитезимальных деформациях  $\nu < 1/3$ .

Энергия является функцией трех переменных, и графическое отображение ее гиперповерхности не представляется возможным. Поэтому ниже представлены графики для двух основных случаев:

- 1) плоско-деформированное состояние при разных  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  и фиксированном значении  $\lambda_C$  (не обязательно равном единице);
- 2) трансверсально-изотропная деформация, для которой  $\lambda_B = \lambda_C$  при разных  $\lambda_A$ .

*Плоско-деформированное состояние.* На рис. 3а и 3б представлены графики потенциальной энергии предлагаемой механико-геометрической модели при значении параметра модели  $k=1$ : форма поверхности функции  $\mathcal{E}(\lambda_A, \lambda_B, 1)$  – рис. 3а и линии уровня для этой поверхности – рис. 3б.

Функция энергии удовлетворяет требованиям теории упругости. Она является величиной положительной как при сжатии ( $\lambda_A, \lambda_B < 1$ ), так и при растяжении ( $\lambda_A, \lambda_B > 1$ ). В точке (1,1), т.е. при отсутствии деформаций, она имеет минимальное значение, равное нулю. Энергия является выпуклой функцией своих аргументов  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  при значении параметра модели  $k > 0$  и при любых деформациях. Выпуклость энергии при  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C > 0$  была проверена численными расчетами.

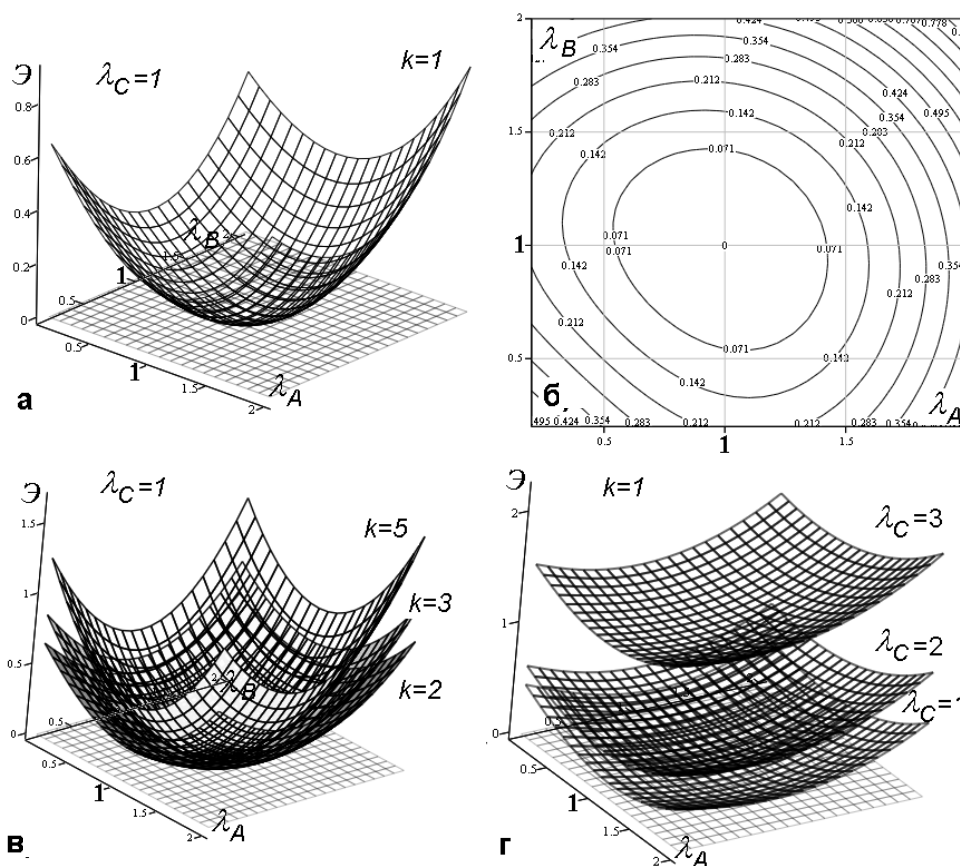


Рис. 3. Форма графика функции потенциальной энергии при плоском деформированном состоянии и положительных значениях  $k$

Графики энергии при различных значениях параметра  $k$  и при различных значениях деформации  $\lambda_C$  представлены на рис. 3в и 3г. Во всех этих случаях выпуклость энергии сохраняется.

Перейдем к рассмотрению формы энергии при значениях параметра модели  $k$  из диапазона  $-0,5 < k < 0$ , что соответствует значению коэффициента

Пуассона при инфинитезимальных деформациях ( $\nu > 1/3$ ).

На рис. 4 представлен график поверхности потенциальной энергии деформации при  $\lambda_C = 1$  (т.е. деформация плоская без растяжения или сжатия по направлению  $C$ ) и значении параметра модели  $k = -0,3$ , а также соответствующие ему линии уровня.

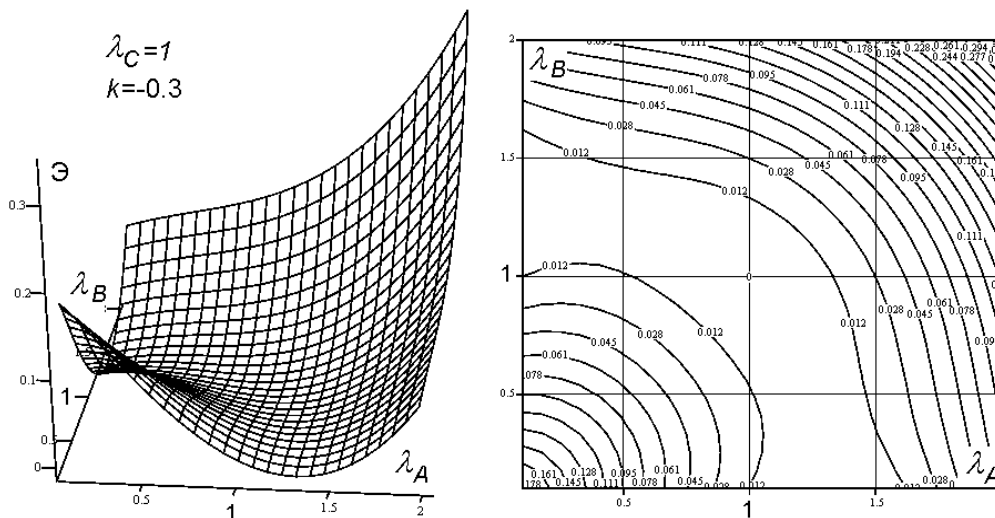


Рис. 4. Форма графика функции потенциальной энергии при плоском деформированном состоянии и отрицательных значениях  $k$

На всех графиках функции энергии при отрицательных значениях параметра  $k$  существуют области, где функция является невыпуклой. В этих областях материал, описываемый моделью с соответствующим параметром  $k$ , является нестабильным. Чем меньше параметр  $k$ , тем больше области неустойчивости материала. Важно, что в области малых деформаций при любых значениях параметра  $k > -0,5$  функция энергии является выпуклой.

Надо заметить, что при выполнении условия  $\lambda_A + \lambda_B > 2$  функция выпукла при любых значениях параметра  $k > -0,5$ . Области невыпуклости функ-

ции потенциальной энергии находятся только ниже сечения  $\lambda_A + \lambda_B = 2$ .

Отметим также траекторию деформации  $\lambda_A = \lambda_B$ . Это траектория равного растяжения-сжатия по двум осям (equibiaxial strain). Вдоль этой траектории функция энергии также является выпуклой при любых значениях  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$ .

*Трансверсально-изотропная деформация.* На рис. 5 представлены графики энергии и линии уровня при положительном значении параметра  $k=1$  (а) и при отрицательном  $k = -0,3$  (б). На этих графиках имеются траектории, соответствующие случаю одноосного растяжения.

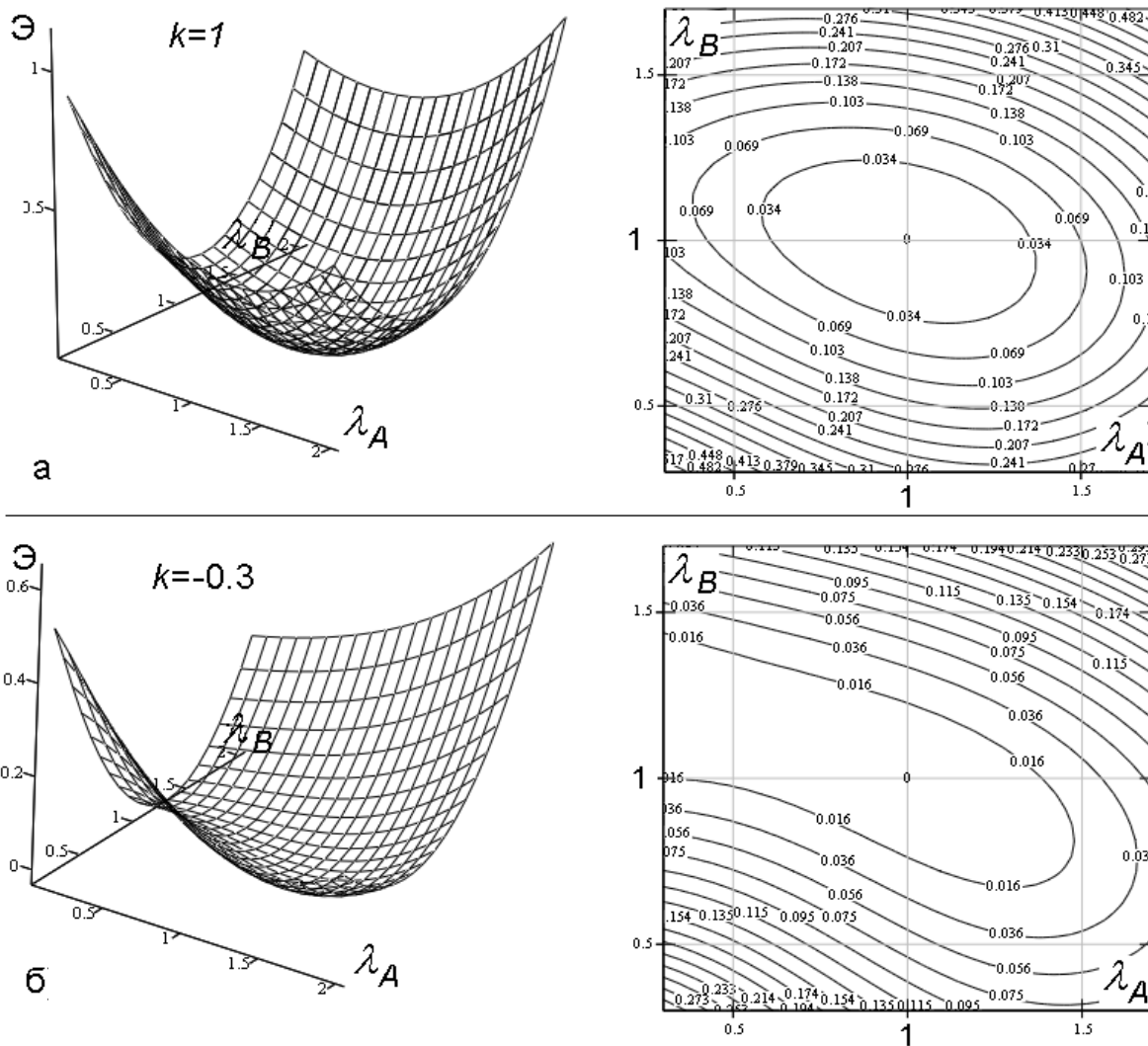


Рис. 5. Форма графика функции потенциальной энергии при трансверсально-изотропной деформации

Все графики при  $k > 0$  имеют одинаковый вид: положительной и выпуклой поверхности, с минимумом энергии в начальном недеформированном состоянии при  $\lambda_A = \lambda_B = 1$ .

Все графики при  $-0,5 < k < 0$  имеют область недопустимых деформаций, где энергия невыпукла.

В сравнении с симметричными областями невыпуклой энергии на предыдущих графиках случая плоской деформации, на графиках для трансверсально-изотропной деформации симметрия отсутствует. Надо отметить также траекторию деформации  $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C$ . Это – траектория трехосного (объ-

емного) растяжения-сжатия (triaxial strain). Вдоль неё функция энергии также является выпуклой при любых значениях  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  (и, соответственно,  $\lambda_C$ ).

Численный анализ показывает, что основные виды напряженно-деформированных состояний (одноосное растяжение, двухосное (плоское) растяжение-сжатие, объемное сжатие) могут быть реализованы в материале, описываемом моделью с любым параметром  $k > -0,5$ . На траекториях, соответствующих таким напряженно-деформированным состояниям, потенциальная энергия деформации выпукла и материал ведет себя стабильно.

### Заключение

1. Вышесказанное позволяет утверждать, что материал, описываемый предложенной механико-геометрической моделью, является «гиперупругим» материалом в смысле существования потенциала [1, 7].

2. Анализ свойств энергии модели показывает, что эта функция удовлетворяет всем основным требованиям механики сплошной среды в определенных областях деформаций, зависящих от значений параметров модели.

3. Нужно отметить, что новый механико-геометрический способ построения определяющих соотношений позволяет получать разнообразные функции потенциальной энергии деформации, априори обладающих свойствами, не противоречащими физически обусловленным требованиям теории упругости.

4. Метод механико-геометрического моделирования потенциальной энергии деформации имеет перспективы для дальнейшего развития.

### Литература

1. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М., 1970. 940 с.
2. Азаров А.Д., Азаров Д.А. Трехмерная механическая модель для описания больших упругих деформаций при одноосном растяжении // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11, № 2 (53). С. 147–156.
3. Азаров А.Д., Азаров Д.А. Сопоставление трехмерной механической модели с законом состояния Мурнагана // Современные проблемы механики сплошной среды: тр. XVI Междунар. конф. 16–19 октября 2012 г. Ростов н/Д., 2012. Т. I. С. 5–9.

4. Азаров А.Д., Азаров Д.А. Описание больших сдвиговых деформаций упругой среды с помощью трехмерной механической модели // Труды VII Всерос. (с междунар. участием) конф. по механике деформируемого твердого тела, г. Ростов н/Д., 15–18 октября 2013 г. : в 2 т. Т. I. Ростов н/Д., 2013. С. 17–21.
5. Azarov A.D., Azarov D.A. Description of non-linear viscoelastic deformations by the 3D mechanical model // Physics, Mechanics of New Materials and Their Applications: Proceedings of the 2015 International Conference, devoted to the 100th Anniversary of the Southern Federal University / I.A. Parinov, S.-Hsyung, V.Yu. Topolov (Eds.). N.Y., 2016. P. 367–375.
6. Пальмов В.А. Колебания упругопластических тел. М., 1976. 328 с.
7. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. М., 1975. 522 с.

### References

1. Lur'e A.I. *Nelineinaya teoriya uprugosti* [Nonlinear theory of elasticity]. Moscow, 1970, 940 p.
2. Azarov A.D., Azarov D.A. Trekhmernaya mekhanicheskaya model' dlya opisaniya bol'shikh uprugikh deformatsii pri odnoosnom rastyazhenii [Three-dimensional mechanical model to describe the large elastic deformation in uniaxial tension]. *Vestnik DGTU*, 2011, vol. 11, no 2 (53), pp. 147–156.
3. Azarov A.D., Azarov D.A. [A comparison of three-dimensional mechanical model of the law of the state of the Murnaghan]. *Sovremennye problemy mekhaniki sploshnoi sredy* [Contemporary problems of continuum mechanics]. Works XVI Intern. Conf. October 16–19, 2012. Rostov-on-Don, 2012, vol. 1, pp. 5–9.
4. Azarov A.D., Azarov D.A. [Description of large shear deformation of an elastic medium with the help of three-dimensional mechanical model]. *Trudy VII Vseros. (s mezhduнар. uchastiem) konf. po mekhanike deformiruemogo tverdogo tela* [Proceedings of the VII All-Russia. (With Intern. Participation) Conf. on Solid Mechanics]. Rostov-on-Don, October 15–19, 2013: in 2 vol. Vol. 1. Rostov-on-Don, 2013, pp 17–21.
5. Azarov A.D., Azarov D.A. Description of non-linear viscoelastic deformations by the 3D mechanical model. *Physics, Mechanics of New Materials and Their Applications*. Proceedings of the 2015 International Conference devoted to the 100th Anniversary of the Southern Federal University / Ivan A. Parinov, Shun-Hsyung, Vitaly Yu. Topolov (Eds.). New York, 2016, pp. 367–375.
6. Pal'mov V.A. *Kolebaniya uprugoplasticheskikh tel* [The vibrations of elastic plastic bodies]. Moscow, 1976, 328 p.
7. Trusdell K. *Pervonachal'nyi kurs ratsional'noi mekhaniki sploshnykh sred* [Initial course a rational continuum mechanics]. Moscow, 1975, 522 p.

УДК 517 955.8

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-13-19

## АСИМПТОТИКА СТАЦИОНАРНЫХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ РЭЛЕЯ С ДИФФУЗИЕЙ

© 2016 г. А.В. Казарников, С.В. Ревина

Казарников Алексей Владимирович – аспирант, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: kazarnikov@gmail.com

Kazarnikov Aleksei Vladimirovich – Post-Graduate Student, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science of the Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: kazarnikov@gmail.com

Ревина Светлана Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090; научный сотрудник, Южный математический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, пр. Маркуса, 22, г. Владикавказ, 362000, e-mail: svrevina@sfnedu.ru

Revina Svetlana Vasil'evna – Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science of the Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Researcher, Southern Mathematic Institute of Vladikavkaz Scientific Center RAS, Marcus St., 22, Vladikavkaz, 362027, Russia, e-mail: svrevina@sfnedu.ru

Для системы Рэлея с диффузией проведен анализ бифуркационного поведения вторичных решений, ответвляющихся от нулевого решения при изменении управляющего параметра. Явно найдены выражения первых членов асимптотики, получены формулы общего члена разложения, когда на границе области выполняются краевые условия Дирихле или смешанные краевые условия. Изучено качественное поведение стационарных решений в зависимости от краевых условий, численно исследована эволюция стационарных режимов, когда пространственная переменная изменяется на отрезке или в прямоугольнике.

**Ключевые слова:** система Рэлея, метод Ляпунова – Шмидта, монотонная неустойчивость, стационарные решения, асимптотический анализ, системы реакции-диффузии.

We consider Rayleigh reaction-diffusion system and study the bifurcational behavior of solutions, branching from zero due to the variation of control parameter. It is assumed that Dirichlet boundary conditions or mixed boundary conditions are set on the boundary of spatial domain. First terms of asymptotics are found explicitly, expressions for consecutive terms are derived. The qualitative dependence of solutions on boundary conditions is studied for one-dimensional (interval) and two-dimensional (rectangle) spatial domains. The evolution of solutions is studied numerically.

**Keywords:** Rayleigh system, Lyapunov-Schmidt reduction, monotonic instability, stationary solutions, asymptotic analysis, reaction-diffusion systems.

### Постановка задачи

В настоящее время немало работ посвящено исследованию нелинейных параболических систем, называемых системами реакции-диффузии. Эти системы широко применяются при моделировании химических [1], биологических [2, 3], физиологических [4, 5] и других процессов.

Особый интерес вызывают бифуркации, в результате которых образуются новые решения, служащие математической моделью наблюдаемых в природе пространственно-временных структур [6]. Как правило, такие решения исследуются численно [7–10] или с применением асимптотических методов [11]. В настоящей работе для построения асимптотики стационарных решений применяется

метод Ляпунова – Шмидта в форме, развитой в работах В.И. Юдовича [12, 13].

Классической моделью возбудимой среды является система Фитцхью – Нагумо, возникающая как модель распространения нервного импульса [4, 5]:

$$v_t = v_1 \Delta v + \varepsilon(w - \alpha v - \beta), \quad w_t = v_2 \Delta w - v + \mu w - w^3, \quad (1)$$

где  $v = v(x, t)$ ;  $w = w(x, t)$ ;  $x \in \Omega$ ;  $t > 0$ ,  $\Omega \subset R^m$  – ограниченная область с кусочно-гладкой границей;  $\mu \in R$  – управляющий параметр;  $\alpha \geq 0$ ,  $\beta \geq 0$ ,  $\varepsilon > 0$ ,  $v_1, v_2 > 0$  – фиксированные параметры системы, причем обычно предполагают, что  $v_1 \leq v_2$  [6].

Положив в (1)  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ ,  $\varepsilon = 1$ , получим систему Рэлея с диффузией

$$v_t = v_1 \Delta v + w, \quad w_t = v_2 \Delta w - v + \mu w - w^3, \quad (2)$$

которую можно рассматривать как бесконечномерный аналог классической системы Рэля, получающейся из (2) при  $v_1 = v_2 = 0$ . На границе области  $\Omega$  заданы краевые условия Дирихле

$$v|_{\partial\Omega} = w|_{\partial\Omega} = 0 \quad (3)$$

либо смешанные краевые условия, когда на части границы заданы краевые условия Дирихле, а на оставшейся границе – Неймана

$$v|_{S_1} = w|_{S_1} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial n}|_{S_2} = \frac{\partial w}{\partial n}|_{S_2} = 0, \quad S_1 \cup S_2 = \partial\Omega. \quad (4)$$

Целью данной работы является построение асимптотики стационарных решений системы (2), ответвляющихся от тривиального (нулевого) решения при изменении управляющего параметра  $\mu$  и фиксированных коэффициентах диффузии  $0 < v_1 \leq v_2$  вследствие монотонной потери устойчивости. Колебательная потеря устойчивости рассмотрена в [14]. Случай равных коэффициентов диффузии  $v_1 = v_2$  исследован в [15].

### Основные определения

Сведем систему Рэля (2) к обыкновенному дифференциальному уравнению в гильбертовом пространстве  $H$  вектор-функций  $\mathbf{u} = (v, w)$ , компоненты которых принадлежат  $L_2(\Omega)$ . Скалярное произведение  $\mathbf{f} = (f_1, f_2) \in H$  и  $\mathbf{g} = (g_1, g_2) \in H$  определяется стандартным образом

$$(\mathbf{f}, \mathbf{g}) = \int_{\Omega} [f_1 g_1 + f_2 g_2] dx.$$

Пусть  $A(\mu): H \rightarrow H$  – линейный оператор, действующий на вектор-функцию  $\mathbf{u} = (v, w)$ , где  $v, w$  принадлежат пространству Соболева  $W_2^2(\Omega)$ , по правилу

$$A(\mu)\mathbf{u} = D\Delta\mathbf{u} + B\mathbf{u} + \mu C\mathbf{u}.$$

Здесь  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ ,

$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $D = \begin{pmatrix} v_1 & 0 \\ 0 & v_2 \end{pmatrix}$ . В области определения оператора  $A(\mu)$ , как обычно, учитываются краевые условия. Зададим оператор  $K(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}): H^3 \rightarrow H$  по правилу

$$K(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) = \begin{pmatrix} 0 \\ a_2 b_2 c_2 \end{pmatrix}.$$

Тогда систему (2) можно записать в операторном виде

$$\dot{\mathbf{u}} = A(\mu)\mathbf{u} - K(\mathbf{u}, \mathbf{u}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{u} \in H. \quad (5)$$

Значение параметра  $\mu$ , при котором собственные значения линейного оператора  $A(\mu)$  выходят на мнимую ось, будем называть критическим и обозначать  $\mu_{cr}$ . Будем говорить, что в системе Рэля с диффузией (5) происходит колебательная потеря устойчивости, если оператор  $A(\mu_{cr})$  имеет пару чисто мнимых собственных значений  $\sigma_{1,2}(\mu_{cr}) = \pm i\omega_0$ . Если у оператора  $A(\mu_{cr})$  на мнимой оси есть одно нулевое собственное значение  $\sigma(\mu_{cr}) = 0$ , то в системе имеет место монотонная потеря устойчивости.

### Задача на собственные значения

Для исследования устойчивости по линейному приближению нулевого решения системы Рэля с диффузией рассмотрим линейную спектральную задачу

$$A(\mu)\phi = \sigma\phi. \quad (6)$$

Известно, что в пространстве  $H$  существует ортонормированный базис  $\{\mathbf{e}_1 \psi_k, \mathbf{e}_2 \psi_k\}_{k=1}^{+\infty}$ ,  $\mathbf{e}_1 = (1, 0)$ ;  $\mathbf{e}_2 = (0, 1)$ , где  $\psi_k$  являются собственными функциями скалярного оператора  $-\Delta$ , заданного в области  $\Omega$  с соответствующими краевыми условиями  $-\Delta\psi_k = \lambda_k \psi_k$ , а собственные значения образуют неубывающую последовательность  $\{\lambda_k\}_{k=1}^{+\infty}$ . Первое собственное значение  $\lambda_1$  положительно и имеет кратность  $r=1$  для рассматриваемых краевых условий.

Из (6) находим собственные значения оператора  $A(\mu)$ :

$$\sigma_{1,2}^k(\mu) = \frac{-((v_1 + v_2)\lambda_k - \mu) \pm \sqrt{((v_1 - v_2)\lambda_k + \mu)^2 - 4}}{2}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Тогда условия устойчивости нулевого решения системы (5) можно записать в виде системы неравенств

$$\mu < (v_1 + v_2)\lambda_k; \quad \mu < v_2\lambda_k + \frac{1}{v_1\lambda_k}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Если  $v_1\lambda_1 \geq 1$ , то в системе (5) происходит монотонная потеря устойчивости нулевого решения; критическое значение параметра  $\mu$  определяется по

формуле  $\mu_{cr} = \frac{1}{v_1\lambda_1} + v_2\lambda_1$ ; при  $v_1\lambda_1 < 1$  – колеба-

тельная потеря устойчивости,  $\mu_{cr} = (v_1 + v_2)\lambda_1$ . При  $v_1\lambda_1 \geq 1$  собственные функции  $\phi$  и  $\Phi$  линейной спектральной задачи и линейной сопряженной задачи определяются как нетривиальные решения уравнений

$$A(\mu_{cr})\phi = 0, \quad A^*(\mu_{cr})\Phi = 0$$



и имеют вид

$$\Phi = \frac{1}{1+v_1\lambda_1} \begin{pmatrix} 1 \\ v_1\lambda_1 \end{pmatrix} \Psi_1(x), \quad \Phi = \frac{1}{1-v_1\lambda_1} \begin{pmatrix} 1 \\ -v_1\lambda_1 \end{pmatrix} \Psi_1(x),$$

причем  $(\Phi, \Phi) = 1$  при  $v_1\lambda_1 \neq 1$ . Если  $v_1\lambda_1 = 1$ , то  $(\Phi, \Phi) = 0$ , что соответствует наличию присоединенного вектора. Далее считаем, что  $v_1\lambda_1 > 1$ .

### Первые члены асимптотики вторичных стационарных решений

Уравнение для нахождения стационарных решений системы (2) имеет вид

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u} = \varepsilon^2 C\mathbf{u} - K(\mathbf{u}, \mathbf{u}, \mathbf{u}), \quad (7)$$

где  $\varepsilon = \mu - \mu_{cr}$  – надкритичность. Стационарное решение  $\mathbf{u}$  будем разыскивать в виде ряда по параметру  $\varepsilon$

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon^i \mathbf{u}_i. \quad (8)$$

Подставляя разложение (8) в (7) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях  $\varepsilon$ , приходим к цепочке уравнений

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_1 = 0, \quad (9)$$

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_2 = 0, \quad (10)$$

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_3 = C\mathbf{u}_1 - K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1) \equiv \mathbf{f}_3, \quad (11)$$

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_4 = C\mathbf{u}_2 - 3K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2) \equiv \mathbf{f}_4, \quad (12)$$

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_5 = C\mathbf{u}_3 - 3K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_3) - 3K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_2) \equiv \mathbf{f}_5, \quad (13)$$

$$\dots$$

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_n = C\mathbf{u}_{n-2} - \sum_{i_1+i_2+i_3=n} 3K(\mathbf{u}_{i_1}, \mathbf{u}_{i_2}, \mathbf{u}_{i_3}) \equiv \mathbf{f}_n. \quad (14)$$

Решения однородных уравнений (9) и (10) имеют вид

$$\mathbf{u}_1 = \alpha_1 \Phi, \quad \mathbf{u}_2 = \alpha_2 \Phi, \quad \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}.$$

Неоднородные уравнения (11)–(13) имеют решения тогда и только тогда, когда правая часть ортогональна решению однородного сопряженного уравнения

$$(\mathbf{f}_n, \Phi) = \int_{\Omega} (f_n^1 \Phi_1 + f_n^2 \Phi_2) dx = 0. \quad (15)$$

Для уравнения (11) условие разрешимости (15) имеет вид

$$(\mathbf{f}_3, \Phi) = \alpha_1 (C\Phi, \Phi) - \alpha_1^3 (K(\Phi, \Phi, \Phi), \Phi) = 0.$$

Отсюда находим

$$\alpha_1^2 = \frac{(C\Phi, \Phi)}{(K(\Phi, \Phi, \Phi), \Phi)} = \frac{(1+v_1\lambda_1)^2}{(v_1\lambda_1)^2 \|\Psi_1\|_{L_2}^2}. \quad (16)$$

Так как  $\alpha_1^2 > 0$ , при  $\mu > \mu_{cr}$  существует и устойчива пара нетривиальных стационарных решений [13]. Следовательно, имеет место мягкая поте-

ря устойчивости тривиального решения: при  $\mu < \mu_{cr}$  оно устойчиво, при  $\mu > \mu_{cr}$  оно «передает» устойчивость ответвляющимся стационарным решениям.

Так как условие разрешимости уравнения (11) выполнено, то оператор  $A(\mu_{cr})$  обратим на подпространстве функций, ортогональных  $\Phi$ , и частное решение уравнения (11) можно записать в виде

$$\mathbf{u}_3^p = -(A(\mu_{cr}))^{-1} \mathbf{f}_3, \quad (17)$$

а общее уравнения (11) имеет вид  $\mathbf{u}_3 = \alpha_3 \Phi + \mathbf{u}_3^p$ , где  $\alpha_3$  пока неизвестна.

Из условия разрешимости уравнения (12) выведем, что  $\alpha_2 = 0$ . Следовательно, правая часть уравнения при  $\varepsilon^4$  равна нулю, и решение уравнения (12) будет иметь вид  $\mathbf{u}_4 = \alpha_4 \Phi$ . Рассмотрев условие разрешимости уравнения при  $\varepsilon^5$  (13), находим

$$\alpha_3 = -\frac{3(K(\Phi, \Phi, \mathbf{u}_3^p), \Phi)}{(C\Phi, \Phi)}, \quad (18)$$

где  $(C\Phi, \Phi) = \frac{(v_1\lambda_1)^2}{(v_1\lambda_1)^2 - 1} > 0$ , а  $\alpha_3$  меняет знак на

противоположный при смене знака  $\alpha_1$ .

**Предложение 1.** В системе Рэлея (2) с краевыми условиями (3) или (4) при переходе параметром  $\mu$  значения  $\mu_{cr}$  происходит мягкая потеря устойчивости нулевого равновесия. При малых  $\mu - \mu_{cr}$  существует пара устойчивых стационарных решений системы

$$\mathbf{u} = \pm \alpha \alpha_1 \Phi \pm \varepsilon^3 (\alpha_3 \Phi + \mathbf{u}_3^p) + O(\varepsilon^4), \quad \varepsilon = \sqrt{\mu - \mu_{cr}},$$

где  $\alpha_1$ ,  $\mathbf{u}_3^p$ ,  $\alpha_3$  определяются формулами (16), (17) и (18) соответственно.

### Общий член асимптотики

Для  $n \geq 5$  уравнение при  $\varepsilon^n$  может быть записано в виде (14). По индукции доказывается

**Предложение 2.** Четные компоненты асимптотического разложения стационарного решения равны нулю: для всякого  $k \in \mathbb{N}$   $\mathbf{u}_{2k} = 0$ ,  $\alpha_{2k} = 0$ .

Отсюда получаем, что для нечетных  $n$  уравнение (14) упрощается

$$-A(\mu_{cr})\mathbf{u}_n = C\mathbf{u}_{n-2} - \sum_{i_1+i_2+i_3=n} 3K(\mathbf{u}_{i_1}, \mathbf{u}_{i_2}, \mathbf{u}_{i_3}) \equiv \mathbf{f}_n, \quad (19)$$

причем в сумме, стоящей в правой части (19), индексы  $i_1, i_2, i_3$  нечетны.

Найдем нечетные члены разложения. Рассмотрим уравнение при  $\varepsilon^n$  (19) в случае нечетного

$n \geq 5$ . Будем предполагать, что  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-3}$ ,  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{n-2}$  уже известны.

**Предложение 3.** Амплитуда  $\alpha_{n-2}$  определяется из условия разрешимости уравнения (19) по формуле

$$\alpha_{n-2} = -\frac{3(\mathbf{g}_n, \Phi)}{2(C\Phi, \Phi)},$$

где

$$\mathbf{g}_n = K(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_{n-2}^p) + \sum_{i_1+i_2+i_3=n} K(\mathbf{u}_{i_1}, \mathbf{u}_{i_2}, \mathbf{u}_{i_3}); \quad (i_1, i_2, i_3) \neq (1, 1, n-2),$$

$\mathbf{u}_{n-2}^p$  – частное решение неоднородного уравнения при  $n-2$  степени.

**Следствие 1.** Частное решение  $\mathbf{u}_n^p(x)$  уравнения (19) имеет вид

$$\mathbf{u}_n^p(x) = \sum_{j=2}^{+\infty} (a_j \mathbf{e}_1 + b_j \mathbf{e}_2) f_{jn}^2 \psi_j; \quad f_{jn}^2 = (\mathbf{f}_n(x), \mathbf{e}_2 \psi_j), \quad (20)$$

где коэффициенты  $(a_j; b_j)$  определяются по формуле

$$a_j = \frac{\lambda_1}{(\lambda_j - \lambda_1)(v_1 v_2 \lambda_j \lambda_1 - 1)}, \quad b_j = v_1 \lambda_j a_j, \quad j > 1. \quad (21)$$

Знаменатели в выражениях (21) отличны от нуля, так как

$$v_1 v_2 \lambda_j \lambda_1 > v_1^2 \lambda_1^2 > 1.$$

### Случай одной пространственной переменной

Пусть  $x \in [0, l], l > 0$ . Тогда справедлива формула

$$\psi_i^3(x) = M \psi_i(x) + N \psi_{3i-m}(x), \quad (22)$$

где  $M = \frac{3}{2l}$ ,  $N = -\frac{1}{2l}$ ,  $m=0$  в случае краевых условий Дирихле;  $M = \frac{3}{2l}$ ,  $N = \pm \frac{1}{2l}$ ,  $m=1$  в случае смешанных краевых условий (знак  $N$  выбирается в зависимости от краевых условий: плюс, когда на левом конце отрезка задано краевое условие Неймана, и минус – в противном случае). Выражение для  $\alpha_1$  примет вид

$$\alpha_1^2 = \frac{(1 + v_1 \lambda_1)^2}{(v_1 \lambda_1)^2 M}.$$

Применив к правой части уравнения (11) формулу (22), находим  $\mathbf{u}_3^p$

$$\mathbf{u}_3^p = -\frac{N}{M \sqrt{M}} \begin{pmatrix} a_{3-m} \\ b_{3-m} \end{pmatrix} \psi_{3-m}(x),$$

где коэффициенты  $a_{3-m}$ ,  $b_{3-m}$  определяются по формулам (21). Формула (18) для  $\alpha_3$  примет вид

$$\alpha_3 = -\frac{3}{2} \frac{N^2}{M^2 \sqrt{M}} \frac{b_{3-m}}{v_1 \lambda_1}. \quad (23)$$

Находим первые члены асимптотики

$$\mathbf{u} = \pm \varepsilon \frac{1}{v_1 \lambda_1 \sqrt{M}} \begin{pmatrix} 1 \\ v_1 \lambda_1 \end{pmatrix} \psi_1(x) \pm \varepsilon^3 \left[ \begin{pmatrix} 1 \\ v_1 \lambda_1 \end{pmatrix} \psi_1(x) + \begin{pmatrix} a_{3-m} \\ b_{3-m} \end{pmatrix} \psi_{3-m}(x) \right] + O(\varepsilon^4),$$

где  $\alpha_3$  определяется формулой (23). Сформулируем аналог предложения 3 в одномерном случае.

**Предложение 4.** Если  $x \in [0, l]$  и на концах отрезка заданы краевые условия Дирихле, то в выражениях (19) и (20) компоненты вектор-функций  $\mathbf{f}_n(x)$  и  $\mathbf{u}_n^p(x)$  представляют собой линейные комбинации базисных функций  $\psi_k$  с нечетными индексами  $k$  не выше  $n$ .

**Следствие 2.** Общий член асимптотики стационарных решений при  $n \geq 5$  и краевых условиях Дирихле представляет собой линейную комбинацию базисных функций  $\psi_k$  с нечетными индексами  $k$  не выше  $n$ .

**Следствие 3.** Рассмотрим уравнение (19) в случае нечетного  $n \geq 5$ . Если  $x \in [0, l]$  и на концах отрезка заданы смешанные краевые условия, то в выражениях (19) и (20) компоненты вектор-функций  $\mathbf{f}_n(x)$  и  $\mathbf{u}_n^p(x)$  представляют собой линейные комбинации базисных функций  $\psi_k$  с индексами не выше  $\frac{n+1}{2}$ .

Эволюция пространственно-неоднородного стационарного решения системы при увеличении параметра надкритичности  $\varepsilon$  была исследована численно. Применялся метод прямых с аппроксимацией уравнений на равномерной сетке [8, 10]. Численное интегрирование проводилось при помощи метода Дорманда – Принса с автоматическим выбором шага интегрирования по времени. Рассматривались краевые условия Дирихле, параметры системы взяты равными  $v_1 = 0,5$ ,  $v_2 = 1$ ,  $\mu = \mu_{cr} + \varepsilon^2$ ,  $\mu = \mu_{cr} + \varepsilon^2$  и  $l = 1$ . Обнаружено, что при увеличении значений  $\varepsilon$  профиль решения сохраняет синусоидальную форму. Но для значений  $\varepsilon > 10$   $w(x, t)$  стремится к П-образному профилю (рис. 1), причем  $\max_{x \in [0, l]} |w(x, t)| \sim \varepsilon$ , в то время как  $v(x, t)$  продолжает сохранять свой синусоидальный профиль.

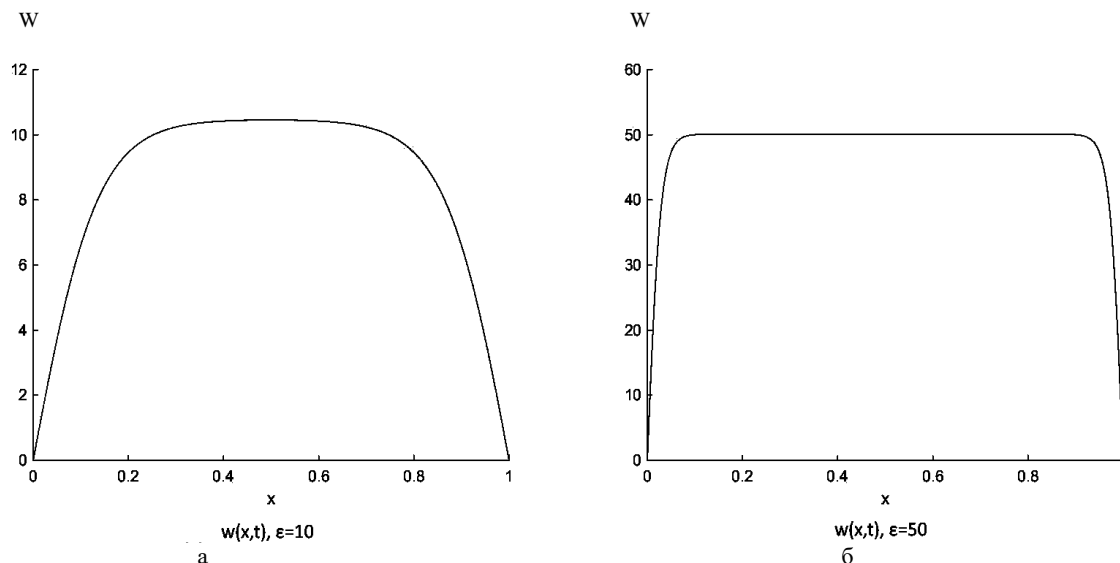


Рис. 1. Профиль второй компоненты решения при различных значениях  $\epsilon$

Вследствие симметрии системы (2) относительно замены переменных  $(\tilde{v}, \tilde{w}) = (-v, -w)$ , для каждого стационарного решения системы существует также решение, получаемое зеркальным отражением соответствующего профиля относительно оси абсцисс.

**Случай двух пространственных переменных**

Пусть теперь  $x = (x_1, x_2)$ ,  $x_1 \in [0, l_1]$ ,  $x_2 \in [0, l_2]$ ,  $l_{1,2} > 0$ . Тогда справедлив аналог формулы (22)

$$\Psi_{(1,1)}^3(x) = M\Psi_{(1,1)}(x) + N\Psi_{(3-m,1)}(x) + P\Psi_{(1,3-n)}(x) + Q\Psi_{(3-m,3-n)}(x), \tag{24}$$

где  $M = \left(\frac{3}{2\sqrt{l_1 l_2}}\right)^2$ ,  $N = \pm\left(\frac{2}{\sqrt{l_1 l_2}}\right)^2$ ,  $P = \pm\left(\frac{2}{\sqrt{l_1 l_2}}\right)^2$ ,

$Q = \left(\frac{1}{2\sqrt{l_1 l_2}}\right)^2$  и  $m, n = 0, 1$  выбираются в зависимости от краевых условий, аналогично случаю одной пространственной переменной. Формула для  $\alpha_1$  принимает вид

$$\alpha_1^2 = \frac{(1 + v_1 \lambda_{(1,1)})^2}{(v_1 \lambda_{(1,1)})^2 M}.$$

Применив к правой части уравнения (11) формулу (24), находим  $\mathbf{u}_3^p$

$$\mathbf{u}_3^p = -\frac{N}{M\sqrt{M}} \begin{pmatrix} a_{(3-m,1)} \\ b_{(3-m,1)} \end{pmatrix} \Psi_{(3-m,1)}(x) - \frac{P}{M\sqrt{M}} \begin{pmatrix} a_{(1,3-n)} \\ b_{(1,3-n)} \end{pmatrix} \Psi_{(1,3-n)}(x) - \tag{25}$$

$$-\frac{Q}{M\sqrt{M}} \begin{pmatrix} a_{(3-m,3-n)} \\ b_{(3-m,3-n)} \end{pmatrix} \Psi_{(3-m,3-n)}(x),$$

где коэффициенты  $a_{(i,j)}$ ,  $b_{(i,j)}$  определены в (21).

Формула (18) для  $\alpha_3$  примет вид

$$\alpha_3 = -\frac{3}{2} \frac{(b_{(3-m,1)} N^2 + b_{(1,3-n)} P^2 + b_{(3-m,3-n)} Q^2)}{v_1 \lambda_{(1,1)} M^2 \sqrt{M}}. \tag{26}$$

Первые члены асимптотики имеют вид

$$\mathbf{u} = \pm \epsilon \frac{1}{v_1 \lambda_{(1,1)} \sqrt{M}} \begin{pmatrix} 1 \\ v_1 \lambda_{(1,1)} \end{pmatrix} \Psi_{(1,1)}(x) \pm \pm \epsilon^3 \left[ \alpha_3 \begin{pmatrix} 1 \\ v_1 \lambda_{(1,1)} \end{pmatrix} \Psi_{(1,1)}(x) + \mathbf{u}_3^p \right] + O(\epsilon^4),$$

где  $\mathbf{u}_3^p$  и  $\alpha_3$  определены в (25) и (26) соответственно. Сформулируем аналог предложения 3 для двумерного случая.

**Предложение 5.** Если  $x = (x_1, x_2)$ ,  $x_1 \in [0, l_1]$ ,  $x_2 \in [0, l_2]$  и на границе прямоугольника заданы краевые условия Дирихле, то в выражениях (19) и (20) компоненты вектор-функций  $\mathbf{f}_n(x)$  и  $\mathbf{u}_n^p(x)$  представляют собой линейные комбинации базисных функций  $\Psi_{(k_1, k_2)}$  со значениями мультииндекса, не превосходящими  $(n, n)$ .

**Следствие 4.** Общий член асимптотики стационарных решений при  $n \geq 5$  и краевых условиях Дирихле представляет собой линейную комбинацию базисных функций  $\Psi_{(k_1, k_2)}$  со значениями мультииндекса, не превосходящими  $(n, n)$ .

**Следствие 5.** Рассмотрим уравнение (19) в случае нечетного  $n \geq 5$ . Если  $x_1 \in [0, l_1]$ ,  $x_2 \in [0, l_2]$ , и на

одной из границ прямоугольника заданы краевые условия второго рода, а на остальной части границы – первого рода, то в выражениях (19) и (20) компоненты вектор-функций  $\mathbf{f}_n(x)$  и  $\mathbf{u}_n^p(x)$  представляют собой линейные комбинации базисных функций  $\Psi_{(k_1, k_2)}$  со значениями мультииндекса, не превосходящими  $(n, \frac{n+1}{2})$ .

Для численных экспериментов были выбраны те же значения параметров, что и в случае одной пространственной переменной. Система рассматривалась на единичном квадрате ( $l_1 = 1, l_2 = 1$ ). Результаты численных экспериментов полностью аналогичны случаю одной пространственной переменной (рис. 2).

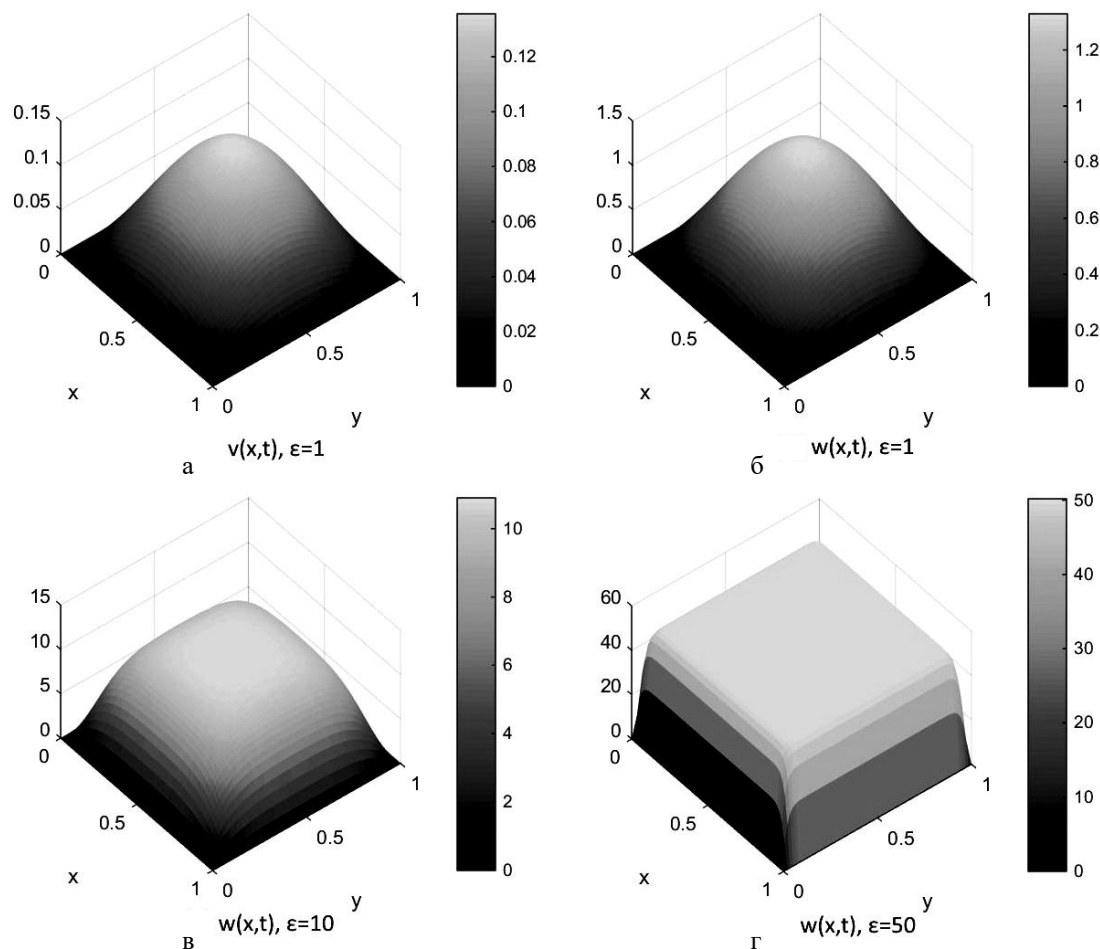


Рис. 2. Профили компонент решения при различных значениях  $\epsilon$

### Литература

1. Schnakenberg J. Simple chemical reaction systems with limit cycle behaviour // J. of Theoretical Biology. 1971. Vol. 81. P. 389–400.
2. Turing A.M. The chemical basis of morphogenesis // Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B. 1952. Vol. 237, № 641. P. 37–72.
3. Murray J.D. Mathematical biology II: Spatial models and biomedical applications. Springer-Verlag, 1993. P. 71–98.
4. Fitzhugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophysical J. 1961. № 1. P. 257–278.
5. Nagumo J.M. An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50. P. 2061–2070.
6. Cross M., Greenside H. Pattern formation and dynamics in nonequilibrium systems. Cambridge, 2009. 553 p.
7. Загребнева А.Д., Говорухин В.Н., Сурков Ф.А. Бифуркации в модели активный хищник – пассивная жертва // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 3. С. 94–106.
8. Кругликов М.Г., Цибулин В.Г. Анализ модели сосуществования популяций, конкурирующих на пространственно-неоднородном ареале // Экол. вестн. науч. центров Черноморского экономического сотрудничества. 2015. № 2. С. 56–64.

9. Загребнева А.Д., Тютюнов Ю.В., Сурков Ф.А., Азовский А.И. Численная реализация модели таксис – реакция – диффузия, описывающей динамику системы хищник – жертва // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. 2010. № 2. С. 12–16.
10. Глызин С.Д., Колесов А.Ю., Розов Н.Х. Релаксационные колебания и диффузионный хаос в реакции Белоусова // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2011. Т. 51, № 8. С. 1400–1418.
11. Ward M.J. Asymptotic methods for reaction-diffusion systems: past and present // *Bulletin of Mathematical Biology*. 2006. Vol. 68. P. 1151–1167.
12. Юдович В.И. Исследование автоколебаний сплошной среды, возникающих при потере устойчивости стационарного режима // Прикладная математика и механика. 1972. Т. 36, № 3. С. 450–459.
13. Юдович В.И. Пример потери устойчивости и рождения вторичного течения жидкости в замкнутом сосуде // *Мат. сб.* 1967. Т. 74, № 116. С. 565–579.
14. Казарников А.В., Ревина С.В. Возникновение автоколебаний в системе Рэлея с диффузией // *Вестн. ЮУрГУ. Мат. моделирование и программирование*. 2016. Т. 9, № 2. С. 16–28.
15. Kazarnikov A.V., Revina S.V., Haario H. Numerical and asymptotical analysis of Rayleigh reaction-diffusion system // *Numerical algebra with applications: Proceedings of Fourth China-Russia Conference*. 2015. Rostov-on-Don, C. 114–119.
7. Zagrebneva A.D., Govorukhin V.N., Surkov F.A. Bifurkatsii v modeli aktivnyi khishchnik – passivnaya zhertva [Bifurcations in a predator model active - passive victim]. *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineinaya dinamika*, 2014, vol. 22, no 3, pp. 94-106.
8. Kruglikov M.G., Tsibulin V.G. Analiz modeli sosushchestvovaniya populyatsii, konkuriruyushchikh na prostranstvenno-neodnorodnom areale [Analysis of the model of coexistence of populations, competing in a spatially inhomogeneous areal]. *Ekol. vestn. nauch. tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*, 2015, no 2, pp. 56-64.
9. Zagrebneva A.D., Tyutyunov Yu.V., Surkov F.A., Azovskii A.I. Chislennaya realizatsiya modeli taksis – reaktsiya – diffuziya, opisuyayushchei dinamiku sistemy khishchnik-zhertva [The numerical implementation of the model taxis - reaction - diffusion, describing the dynamics of predator-prey system]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 2010, no 2, pp. 12-16.
10. Glyzin S.D., Kolesov A.Yu., Rozov N.Kh. Relaksatsionnye kolebaniya i diffuzionnyi khaos v reaktsii Belousova [Relaxation oscillations and diffusion chaos in the Belousov reaction]. *Zhurn. vychisl. matematiki i mat. fiziki*, 2011, vol. 51, no 8, pp. 1400-1418.
11. Ward M.J. Asymptotic methods for reaction-diffusion systems: past and present. *Bulletin of Mathematical Biology*, 2006, vol. 68, pp. 1151-1167.
12. Yudovich V.I. Issledovanie avtokolebaniy sploshnoi sredy, vznikayushchikh pri potere ustoychivosti statsionarnogo rezhima [The study of self-oscillations of a continuous medium, arising from the loss of stability of the stationary mode]. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 1972, vol. 36, no 3, pp. 450-459.
13. Yudovich V.I. Primer poteri ustoychivosti i rozhdeniya vtorichnogo techeniya zhidkosti v zamknutom sosude [An example of loss of stability and generation of a secondary flow in a closed vessel]. *Mat. sb.*, 1967, vol. 74, no 116, pp. 565-579.
14. Kazarnikov A.V., Revina S.V. Voznikovenie avtokolebaniy v sisteme Releya s diffuziei [The emergence of self-oscillations in a system with Rayleigh diffusion]. *Vestn. YuUrGU. Mat. modelirovaniye i programmirovaniye*, 2016, vol. 9, no 2, pp. 16-28.
15. Kazarnikov A.V., Revina S.V., Haario H. Numerical and asymptotical analysis of Rayleigh reaction-diffusion system. *Numerical algebra with applications*. Proceedings of Fourth China-Russia Conference. Rostov-on-Don, 2015, pp. 114-119.

## References

1. Schnakenberg J. Simple chemical reaction systems with limit cycle behavior. *J. of Theoretical Biology*, 1971, vol. 81, pp. 389-400.
2. Turing A.M. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B*, 1952, vol. 237, no 641, pp. 37-72.
3. Murray J.D. *Mathematical biology II: Spatial models and biomedical applications*. Springer-Verlag, 1993, pp. 71-98.
4. Fitzhugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical J.*, 1961, no 1, pp. 257-278.
5. Nagumo J.M. An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IRE*, 1962, vol. 50, pp. 2061-2070.
6. Cross M., Greenside H. *Pattern formation and dynamics in nonequilibrium systems*. Cambridge, 2009, 553 p.

УДК 551.4.013

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-20-24

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОБВАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТИНУАЛЬНОГО ПОДХОДА\*

© 2016 г. Н.С. Орлова, М.В. Волик

Орлова Наталья Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра математики и информатики, Финансовый университет при Правительстве РФ; ученый секретарь, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра Российской академии наук, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, 362027, e-mail: norlova.umi.vnc@gmail.com

Волик Мария Владимировна – старший преподаватель, кафедра математики и информатики, Финансовый университет при Правительстве РФ; младший научный сотрудник, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра Российской академии наук, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, 362027, e-mail: volikmv@mail.ru

Orlova Natalya Sergeevna – Candidate of Technical Science, Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics, Financial University under the Government of RF; Scientific Secretary, Southern Mathematical Institute of VSC RAS, Markus St., 22, Vladikavkaz, 362027, Russia, e-mail: norlova.umi.vnc@gmail.com

Volik Maria Vladimirovna – Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics, Financial University under the Government of RF; Junior Researcher, Southern Mathematical Institute of VSC RAS, Markus St., 22, Vladikavkaz, 362027, Russia, e-mail: volikmv@mail.ru

Рассматривается движение обвала по склону, сопряженному с горизонтальным участком. Теоретическое исследование осуществлялось с использованием свободно распространяемого пакета для решения прикладных задач гидро- и аэромеханики OpenFOAM. Использовалась двухжидкостная модель на основе континуального подхода и кинетической теории гранулярного газа. Представлены результаты двумерных численных расчетов распределения обвальной массы после ее падения в зависимости от угла склона к горизонтальной поверхности.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, обвал, ожигение, континуальный подход, кинетическая теория гранулярных газов, пакет OpenFOAM, решатель twoPhaseEulerFoam.

The rockfall movement of the slope, which is associated with the horizontal section, was investigated. The theoretical investigation was performed using redistributable package OpenFOAM for solution of applied problems of hydro and aerodynamics. Continuum approach and kinetic theory of granular gas were used. Calculations were performed for various values of the slope angle to horizontal surface. Two-dimensional numerical calculations of distribution of rockfall mass were presented.

**Keywords:** mathematical modeling, rockfall, fluidization, continuum approach, kinetic theory of granular gas, OpenFOAM, twoPhaseEulerFoam.

В настоящее время оценка размеров зон поражения, вызванных обвалами массы горных пород, представляется актуальным научно-практическим исследованием. Осуществить его можно с использованием математического моделирования. Несмотря на достаточно большое количество известных зарубежных и отечественных научных работ в этом направлении, отсутствует математическая модель обвалов, которая бы учитывала ожигение обломков, вызванное их хаотическим движением. Под ожигением понимается изменение объемной плотности обломков по толщине слоя, которая может меняться во время его движения.

Для описания обвалов используются в основном дискретные модели, которые описывают движение потока вещества в виде движения совокупности отдельных структурных частиц. Для каждой вы-

бранной структурной частицы вещества определяются ее динамические характеристики (текущие координаты, вектор скорости) на каждом последующем временном шаге с учетом ее параметров и параметров контактирующих с ней частиц на предыдущем шаге. Дискретные модели могут описывать движение потока вещества либо в виде группы отдельных не соударяющихся друг с другом частиц, каждая из которых без сопротивления проходит сквозь другую (соседнюю) частицу, либо в виде группы упруго соударяющихся друг с другом частиц [1–5]. Таким образом, дискретные модели позволяют моделировать ограниченное количество движущихся обломков, увеличение количества которых требует достаточно мощных вычислительных ресурсов, так как необходимо моделировать движение каждого обломка в отдельности.

\*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00147.

Известны и непрерывные модели обвалов [6, 7], в которых движение вещества представляется в виде сплошной среды, характеризующейся неразрывным полем значений физических параметров (скорости, давления, сил). Но эти модели не учитывают процесс ожигения потока обвальных горных пород, движущихся по склону.

В данной работе исследуется математическая модель движения обломков горных пород с использованием континуального подхода, когда движение потока вещества представляется в виде сплошной среды. Такой подход не требует использования мощных вычислительных ресурсов. Кроме того, в модели учитывается ожигение потока обвальных горных пород в процессе их движения по склону. Моделирование ожигения потока обвальных горных пород осуществляется с использованием кинетической теории гранулярных газов, которая учитывает хаотическое движение обломков (вследствие их столкновений друг с другом и с поверхностью склона) как в плотном, так и в разреженном состоянии.

Таким образом, кинетическая теория гранулярных газов дает возможность учесть влияние столкновений обломков друг с другом и со склоном на движение обвалов. Ранее такой подход не применялся для описания обвалов.

В данной работе для моделирования движения обвалов использовался свободно распространяемый пакет для численного моделирования задач гидроаэромеханики OpenFOAM (англ. Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox) при поддержке программы «Университетский кластер» с удаленным доступом к консоли на управляющем узле вычислительного кластера JSCC RAS веб-лаборатории UniHUB (URL: <https://unihub.ru/tools/js3console> (date of treatment: 30.04.2016)).

Для описания движения обвала с учетом ожигения использовался решатель twoPhaseEulerFoam, в котором реализована двухжидкостная модель кипящего (ожигенного) слоя на основе континуального подхода (подхода Эйлера), при котором движение слоя рассматривается как движение двух взаимодействующих континуумов, связанных с газом и частицами. Основные уравнения двухжидкостной модели – уравнения неразрывности и уравнения количества движения для обеих фаз [8–11].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{\varphi}\rho_{\varphi}) + \nabla \cdot (\alpha_{\varphi}\rho_{\varphi}\mathbf{U}_{\varphi}) = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{\varphi}\rho_{\varphi}\mathbf{U}_{\varphi}) + \nabla \cdot (\alpha_{\varphi}\rho_{\varphi}\mathbf{U}_{\varphi}\mathbf{U}_{\varphi}) + \nabla \cdot (\alpha_{\varphi}\mathbf{R}_{\varphi,eff}) = \\ = -\alpha_{\varphi}\nabla P + \alpha_{\varphi}\rho_{\varphi}\mathbf{g} + \mathbf{M}_{\varphi}. \end{aligned} \quad (2)$$

Индекс  $\varphi$  означает принадлежность к фазе (твердой  $a$  или газовой  $b$ , обе фазы считаются несжимаемыми);  $\alpha_{\varphi}$  – объемная доля соответствующей фазы;  $\rho_{\varphi}$ ,  $\mathbf{U}_{\varphi}$  – плотность и вектор скорости фазы;  $\mathbf{R}_{\varphi,eff}$  – тензор эффективных напряжений;  $P$  – давление газовой фазы;  $\mathbf{g}$  – ускорение свободного падения;  $\mathbf{M}_{\varphi}$  – член, моделирующий обмен импульсом между фазами. Выражения для коэффициентов и членов, входящих в уравнения (1), (2), подробно описаны в литературе [8–10].

Для учета эффектов, обусловленных взаимодействием частиц друг с другом, используется кинетическая теория (по аналогии с кинетической теорией газа), с помощью которой можно выразить эффективные напряжения, возникающие в дисперсной фазе за счет движения и столкновений частиц друг с другом. По аналогии с термодинамической температурой вводится гранулярная температура  $\theta$  как средняя энергия флуктуаций скорости частиц (обломков). В работе [9] приведено уравнение для расчета гранулярной температуры.

Проведены тестовые расчеты модели с целью дальнейшего ее использования для моделирования движения обвалов.

Задача решалась в двумерном приближении. Использовались следующие начальные условия:

$$U_a = 0,25; U_b = 0; P = 0; \alpha_a = 0,6; \theta = 0.$$

На рис. 1 представлена область расчетов (рис. 1а) и граничные условия задачи (рис. 1б). Рассматривалась область, состоящая из склона, сопряженного с горизонтальным участком. Расчеты проводились при разном значении угла склона к горизонтальной поверхности ( $\beta_1 = 37^\circ$ ,  $\beta_2 = 45^\circ$  и  $\beta_3 = 54^\circ$ ).

Размеры вычислительной области: высота – 180 м; ширина – 140 м. Движение обвала рассчитывалось за 1300 с. Это позволило рассмотреть движение обвальной массы по склону и горизонтальной поверхности до момента, когда она остановится. При этом использовался шаг по времени, равный 0,005 с. Шаг по пространству равен 1 м. Проводилось распараллеливание расчетов на 8 ядрах.

Далее подробно представлены граничные условия на стенках (wall):

$$U_a = 0; U_b = 0; \frac{\partial P}{\partial n} = 0; \frac{\partial \alpha_a}{\partial n} = 0; \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0,$$

а также на входной левой границе (inlet):

$$U_a = 0; U_b = 0; \frac{\partial P}{\partial n} = 0; \alpha_a = 0; \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0.$$

Граничные условия на верхней и правой свободных границах (outlet):

$$\frac{\partial U_a}{\partial n} = 0; \frac{\partial U_b}{\partial n} = 0; \frac{\partial P}{\partial n} = 0; \frac{\partial \alpha_a}{\partial n} = 0; \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0.$$

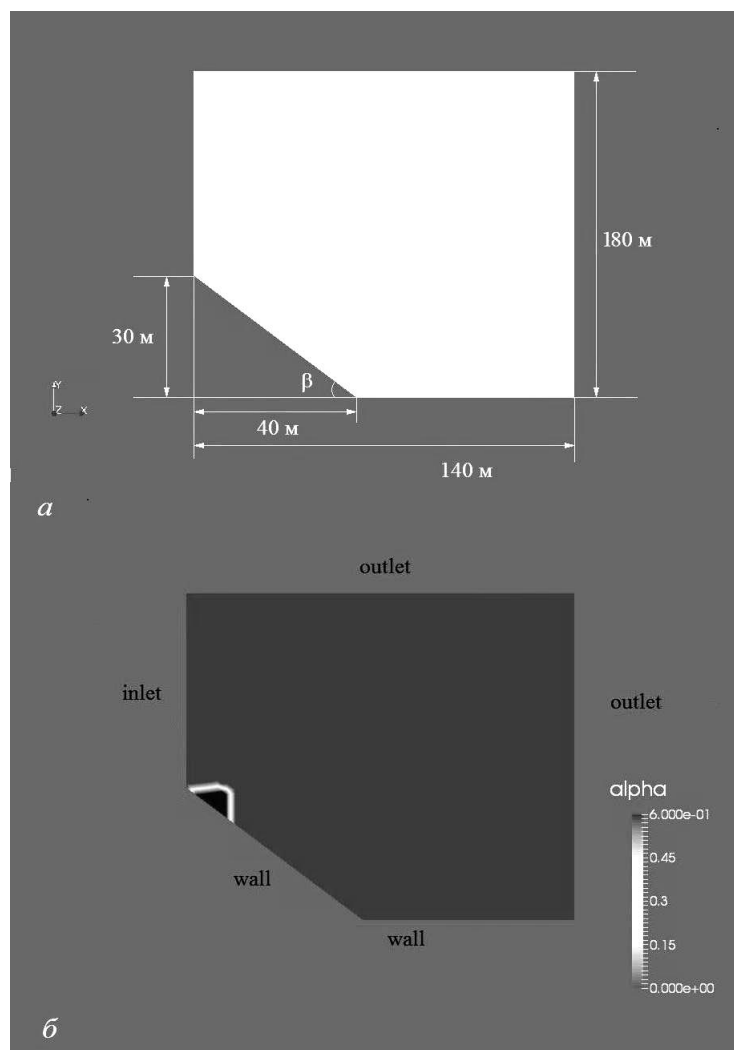


Рис. 1. Область расчетов

В верхней части склона в начальный момент времени располагалась обвальная масса в виде треугольной области площадью сечения примерно  $38 \text{ м}^2$ , как это видно на рис. 1б. Обвальной массе в начальный момент времени задавалась скорость  $0,25 \text{ м/с}$ . Обвальная масса представляется как совокупность твердых частиц сферической формы. Диаметр частиц (обломков) принимался одинаковым и равным  $5 \text{ мм}$ . В дальнейшем планируется увеличивать размер частиц (обломков). Следует отметить, что увеличение размера частиц предполагает увеличение пространственного шага в рамках континуального подхода.

На рис. 2 представлены графики распределения объемной доли обвальной массы (рис. 2а) и ее скорости  $U_a$  (рис. 2б) по нормали к наклонной поверх-

ности в точке с координатами  $x = 18 \text{ м}$ ,  $y = 16 \text{ м}$  в момент времени  $t = 300 \text{ с}$  при  $\beta_1 = 37^\circ$ . Результаты расчетов на рис. 2 показывают неравномерное распределение обвальной массы, а также ее скорости по высоте слоя. Это свидетельствует об ожигении обвальной массы в процессе ее движения по склону.

На рис. 3 отражена оценка распределения толщины слоя  $H$  вдоль горизонтального участка после падения обвальной массы ( $t = 1000 \text{ с}$ ). Кривая 1 на рис. 3 соответствует  $\beta = \beta_1$ ;  $2 - \beta = \beta_2$ ;  $3 - \beta = \beta_3$ .

Из рис. 3 видно, что с увеличением угла склона к горизонтальной поверхности  $\beta$  максимальное значение толщины слоя увеличивается, а расстояние, пройденное обвальной массой вдоль горизонтальной поверхности, уменьшается (при  $\beta_1 \approx 55^\circ$ ; при  $\beta_2 \approx 50^\circ$ ; при  $\beta_3 \approx 40^\circ$ ).



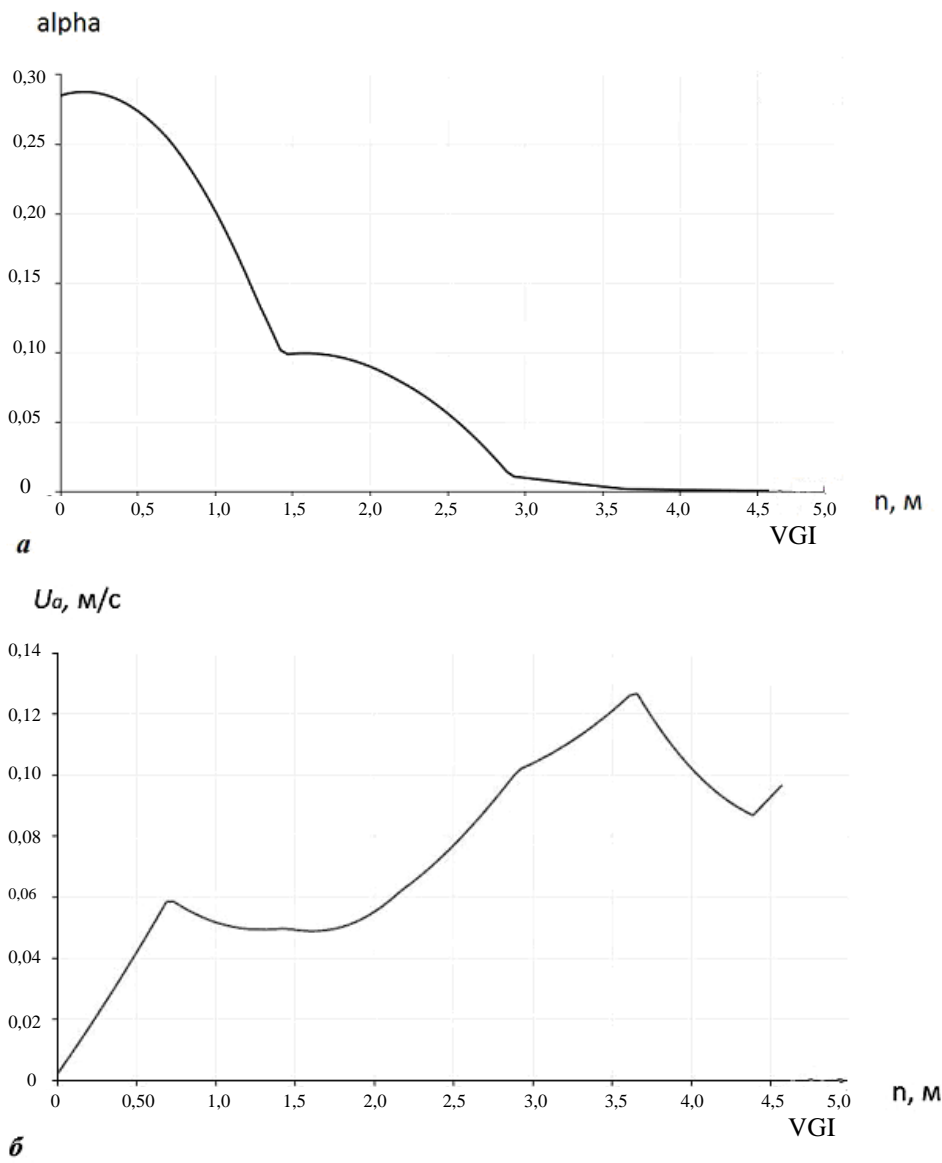


Рис. 2. Распределение обвальной массы и ее скорости по нормали к наклонной поверхности

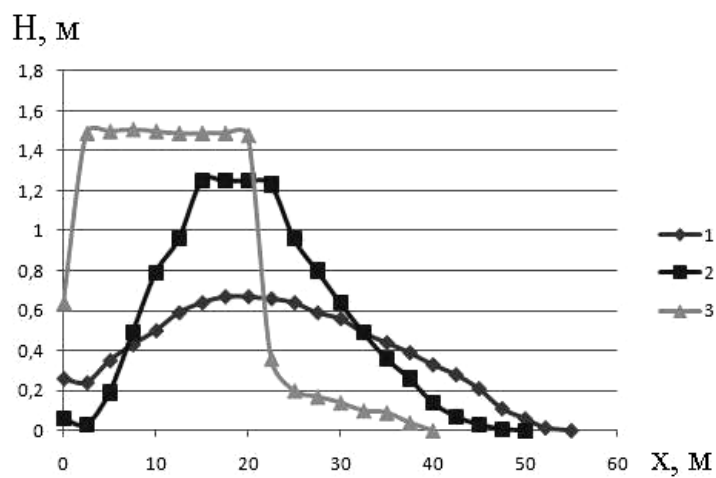


Рис. 3. Распределение толщины слоя вдоль горизонтального участка

Проведено сравнение полученных расчетов с результатами для других известных моделей, которые описывают реальные наблюдения. Полученные размеры зоны поражения в среднем совпадают с результатами, которые рассчитаны по упрощенным динамическим моделям и при обработке данных наблюдений [3, 12].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данную модель можно использовать для описания движения обвалов и оценки зон поражения при обвалах.

#### Литература

1. Михайлов В.О. Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов // Инженерная геология. 2011. № 3. С. 56–63.
2. Михайлов В.О. Трехмерная математическая модель обваловых процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2011. № 4. С. 53–58.
3. Luuk K.A. Dorren A review of rockfall mechanics and modeling approaches // Progress in Physical Geography. 2003. Vol. 27, № 1. P. 69–87.
4. Rammer W., Brauner M., Dorren L.K.A., Berger F., Lexer M.J. Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010. № 10. P. 669–711.
5. Hungr O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches // Canadian Geotechnical J. 1995. Vol. 32, № 4. P. 610–623.
6. Божинский А.Н., Назаров А.Н. Динамика двухфазного селевого потока // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 1999. № 5. С. 15–20.
7. Fangqiang Wei, Hu Kaiheng, Jose Luis Lopez, Cui Peng. Method and its application of the momentum model for debris flow risk zoning // Chinese Science Bulletin. 2003. № 48(6). P. 594–598.
8. Rusche H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions: Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. L., 2002. 343 p.
9. Wachem B. van. Derivation, Implementation, and Validation of Computer Simulation Models for Gas-Solid Fluidized Beds: Dissertation at Delft University of Technology. Delft, 2000. 222 p.
10. Каменецкий Е.С., Орлова Н.С., Волик М.В., Минасян Д.Г. Исследование динамики кипящего гранулированного слоя с использованием пакета OpenFOAM // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 5. С. 37–42.
11. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. Boston, 1994. 211 p.
12. Nilsen M. Modelling of rockfall runout range. Employing empirical and dynamical methods: Master Thesis in Geo-

sciences Discipline: Environmental geology and geohazards. Oslo, 2008. 96 p.

#### References

1. Mikhailov V.O. Klassifikatsiya chislennykh matematicheskikh modelei selevykh i sklonovykh protsessov [Classification of numerical mathematical models of mudflow and slope processes]. *Inzhenernaya geologiya*, 2011, no 3, pp. 56-63.
2. Mikhailov V.O. Trekhmernaya matematicheskaya model' obval'nykh protsessov [A three-dimensional mathematical model of the landslide processes]. *Vestn. Mosk. un-ta. Seriya 5. Geografiya*, 2011, no 4, pp. 53-58.
3. Luuk K.A. Dorren A review of rockfall mechanics and modeling approaches. *Progress in Physical Geography*, 2003, vol. 27, no 1, pp. 69-87.
4. Rammer W., Brauner M., Dorren L.K.A., Berger F., Lexer M.J. Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model. *Natural Hazards and Earth system Sciences*, 2010, no 10, pp. 669-711.
5. Hungr O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. *Canadian Geotechnical J.*, 1995, vol. 32, no 4, pp. 610-623.
6. Bozhinskii A.N., Nazarov A.N. Dinamika dvukhfaznogo selevogo potoka [The dynamics of a two-phase debris flow]. *Vestn. Mosk. un-ta. Seriya 5. Geografiya*, 1999, no 5, pp. 15-20.
7. Fangqiang Wei, Hu Kaiheng, Jose Luis Lopez, Cui Peng. Method and its application of the momentum model for debris flow risk zoning. *Chinese Science Bulletin*, 2003, no 48(6), pp. 594-598.
8. Rusche H. *Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions*. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. London, 2002, 343 p.
9. Wachem B. van. *Derivation, implementation, and validation of computer simulation models for gas-solid fluidized beds*. Dissertation at Delft University of Technology. Delft, 2000, 222 p.
10. Kamenetskii E.S., Orlova N.S., Volik M.V., Minasyan D.G. Issledovanie dinamiki kipyashchego granulirovannogo sloya s ispol'zovaniem paketa OpenFOAM. [The study of the dynamics of fluidized granular layer using the package OpenFoam]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 2014, no 5, pp. 37-42.
11. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions*. Boston, 1994, 211 p.
12. Nilsen M. *Modelling of rockfall runout range. Employing empirical and dynamical methods*. Master Thesis in Geosciences Discipline: Environmental geology and geohazards. Oslo, 2008, 96 p.

УДК 517.982.254, 517.982.276

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-25-30

## ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ И КОМБИНАТОРНЫЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ СТЕПЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ КЁТЕ

© 2016 г. М.А. Шубарин

Шубарин Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, факультет математики, механики и компьютерных наук, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090.

Shubarin Mikhail Aleksandrovich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Faculty of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science of the Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

Изучаются интерполяционные (внутренние и внешние) и комбинаторные свойства степенных пространств Кёте первого рода и степенных пространств Кёте почти первого рода. Интерполяционные свойства формулируются в терминах интерполяции относительно подходящей категории интерполяционных пар, комбинаторные – в терминах совокупностей координатных подпространств рассматриваемых пространств Кёте.

**Ключевые слова:** пространства Кёте, степенные пространства Кёте, интерполяционные классы.

Interpolational (inner and outer) and combinatorial properties of Köthe power spaces are studied in this paper. This interpolational properties are expressed in terms of interpolation related to appropriate category of interpolation pairs, and combinatorial properties are expressed in terms of collection of coordinate subspaces of investigated Köthe spaces.

**Keywords:** Köthe spaces, power Köthe spaces, interpolation classes.

1. Бесконечную матрицу  $\mathbf{A} = (a_{p,n})_{p,n=1}^{\infty}$  называют матрицей Кёте, если для произвольного  $p$  найдутся числа  $q, C$  такие, что  $0 < a_{p,n} \leq Ca_{q,n}$  для произвольного  $n$ . Пространством Кёте (определяемым матрицей Кёте  $\mathbf{A} = (a_{p,n})_{p,n=1}^{\infty}$ ) называют векторное пространство

$$K(\mathbf{A}) = \left\{ x = (x_n)_{n=1}^{\infty} : \forall p \quad \|x\|_p := \sum_{n=1}^{+\infty} (|x_n| a_{p,n}) < +\infty \right\}.$$

Набор норм  $(\|\cdot\|_p)$  задаёт в этом пространстве топологию пространства Фреше (т.е. полного метризуемого локально выпуклого пространства). Последовательность ортов  $\mathbf{e} = (e_n)$ ,  $e_n := (\delta_{k,n})_{k=1}^{+\infty}$  образует абсолютный (канонический) базис в каждом пространстве Кёте.

Пусть  $\mathfrak{v} \subset N$  (всюду в статье предполагается, что  $N$  – множество натуральных чисел;  $N^N$  – множество числовых последовательностей, принимающих значения во множестве натуральных чисел). Замыкание в топологии пространства  $X = K(\mathbf{A})$  линейной оболочки, натянутой на подпоследовательность  $(e_n)_{n \in \mathfrak{v}}$  канонического базиса, называют базисным подпространством (определяемым последовательностью  $\mathfrak{v}$ ) и обозначают

через  $X_{\mathfrak{v}} = K(\mathbf{A}; \mathfrak{v})$ . Свойства пространства Кёте, которые можно сформулировать в терминах совокупности всех его базисных подпространств, будем называть комбинаторными. В предлагаемой статье изучается связь между интерполяционными и комбинаторными свойствами конкретных типов пространств Кёте – степенных пространств Кёте (СПК) первого рода.

Проективное тензорное произведение  $K(\mathbf{A}) \hat{\otimes} K(\mathbf{B})$  канонически изоморфно пространству Кёте  $K(\mathbf{C})$ , где  $c_{p,k} := a_{p,n(k)} d_{p,m(k)}$  и  $((n(k), m(k)))_{k=1}^{+\infty}$  – некоторая перенумерация множества натуральных чисел.

2. Пусть матрица Кёте  $\mathbf{A} = (a_{p,n})$  допускает представление  $a_{p,n} = \exp(h_p(n) a_n)$ , в котором  $a_n \rightarrow +\infty$  при  $n \rightarrow +\infty$ ;  $\forall p \exists q \exists C > 0 : \forall n \quad C^{-1} \leq h_q(n) - h_p(n) \leq C$ ;  $\exp(t) = e^t$ .

Если  $a = (a_n)$  и  $h = (h_p(n))$ , то пространство  $\Phi_h(a) := K(\mathbf{A})$  – СПК. Пространства этого типа были введены Т.Б. Шагиняном [1] (общие свойства СПК изучались также в [2, 3]). Базисные подпространства в  $\Phi_h(a)$  будем обозначать через  $\Phi_h(a; \mathfrak{v})$ .

**Пример 1.** Если  $h_p(n) \equiv \delta_p$ , где  $(\delta_p)$  – числовая последовательность такая, что  $\delta_p \uparrow \delta \in (-\infty, +\infty]$  при  $p \uparrow +\infty$ , то СПК  $E_\delta(a) := \Phi_h(a)$  называют СПК конечного типа (если  $\delta < +\infty$ ) и СПК бесконечного типа (если  $\delta = +\infty$ ). Известно, что пространство  $E_\delta(a)$  не зависит от выбора последовательности  $(\delta_p)$ . Обзор свойств СПК конечного и бесконечного типов содержится в [4–6]. Базисные подпространства в  $E_\delta(a)$  будем обозначать через  $E_\delta(a, \nu)$ .

Условия, выделяющие СПК конечного и бесконечного типов среди всех СПК, формулируются в терминах инвариантных классов  $(D_j)$ ,  $j=1,2$ .

Пространство Фреше  $X$  (топология в котором определяется набором норм  $(\|\cdot\|_p)$ ) принадлежит классу пространств  $(D_j)$ ,  $j=1,2$ , если выполняется условие (1), если  $j=1$ , или (2), если  $j=2$ :

$$\exists p_0 \forall p \exists p_1 \exists C : \forall x \in X \quad \|x\|_p^2 \leq C \|x\|_{p_0} \|x\|_{p_1}, \quad (1)$$

$$\forall p_0 \exists p \forall p_1 \exists C : x' \in X' \quad (\|x'\|_p)^2 \leq C \|x'\|_{p_0} \|x'\|_{p_1}. \quad (2)$$

Здесь  $\|x'\|_p := \sup \{ |x'(x)| : x \in X, \|x\|_p \leq 1 \}$ .

Семейства  $(D_1)$  и  $(D_2)$  были введены соответственно в работах Д. Фогта [7] и Д. Фогта, М.-Й. Вагнера [8]. Следует обратить внимание на то, что в упомянутых работах использовались другие обозначения:  $(D_1) = (DN)$  и  $(D_2) = (\bar{\Omega})$ . Но в контексте статьи удобнее использовать обозначения, предложенные В.П. Захарютой [6].

**Предложение 1** [1, 2]. Для произвольного СПК  $\Phi_h(a)$  условия 1–3 и 4–6, приведенные ниже, попарно эквивалентны:

1.  $\Phi_h(a) \cong E_0(a)$ .
2.  $\Phi_h(a) \in (D_2)$ .
3.  $\forall \varepsilon > 0 \exists p : \forall q \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (h_q(n) - h_p(n)) < \varepsilon$ .
4.  $\Phi_h(a) \cong E_\infty(a)$ .
5.  $\Phi_h(a) \in (D_1)$ .
6.  $\forall \varepsilon > 0 \forall p \exists q : \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (h_q(n) - h_p(n)) > \varepsilon$ .

**Предложение 2** [1, 2]. Если в  $\Phi_h(a)$  нет базисных подпоследовательностей, изоморфных СПК конечного типа, то это пространство изоморфно СПК бесконечного типа.

3. Для произвольного пространства Кёте  $K(A)$  положим  $d_j(K(A)) := \{ \nu = (n_k) : K(A; \nu) \in (D_j) \}$ ,  $j=1,2$ . В других терминах эти классы были определены в [9].

М.М. Драгилев [9] и В.П. Захарюта [10] обратили внимание на то, что свойства СПК существенно зависят от того, как в этих пространствах накапливаются базисные подпространства, изоморфные СПК конечного и бесконечного типов. В качестве характеристики, описывающей совокупности подпространств этого типа, можно взять семейства  $d_j(K(A))$ ,  $j=1,2$ .

**Пример 2.** Если  $h_p(n) = -\frac{1}{p} + \lambda_n p$ ,  $\lambda_n \in (0,1]$ , то СПК  $E(a, \lambda) := \Phi_h(a)$  называют СПК первого рода. Они введены В.П. Захарютой; обзор результатов, связанных с СПК первого рода, они содержатся в [10], где доказывается, что  $E_0(a) \otimes E_\infty(b)$  изоморфно СПК первого рода.

Известно [10, с. 244], что  $\nu \in d_1(E(\lambda, a)) \Leftrightarrow E(\lambda, a) \cong E_\infty(a) \Leftrightarrow \lim_{k \rightarrow +\infty} \lambda_{n_k} > 0$ , (3)

$$\nu \in d_2(E(\lambda, a)) \Leftrightarrow E(\lambda, a) \cong E_0(a) \Leftrightarrow \lim_{k \rightarrow +\infty} \lambda_{n_k} = 0 \quad (4)$$

для произвольной последовательности индексов  $\nu = (n_k)$ ; СПК конечного и бесконечного типа, а также их декартовы и проективные тензорные произведения изоморфны СПК первого рода.

**Определение 1.** Пусть  $\bar{\nu} = (\nu_k)$  – разбиение множества натуральных чисел на бесконечное семейство попарно непересекающихся бесконечных подмножеств и  $j=1,2$ . Будем говорить, что это семейство порождает  $d_j(K(A))$ , если выполняются два условия:  $\nu_k \in d_j(K(A))$  для любого  $k$ ; если  $\nu$  – бесконечная последовательность индексов такая, что  $\nu \cap \nu_k$  конечно для всех  $k$ , то  $\nu \in d_{3-j}(K(A))$ .

Другими словами,  $\nu \in d_j(K(A))$  тогда и только тогда, когда  $\nu \subset \nu_1 \cup \dots \cup \nu_k$  для подходящего индекса  $k$ .

Будем говорить, что пространство Кёте  $K(A)$  имеет тип  $(d_{1,j})$  (и писать  $K(A) \in (d_{1,j})$ ), если существует семейство  $\bar{\nu} = (\nu_k)$ , порождающее  $d_j(K(A))$ .

**Лемма 1.** Если  $K(A) \in (d_{1,j})$  и  $K(B) \cong K(A)$ , то  $K(B) \in (d_{1,j})$ .

**Лемма 2.**  $(d_{1,1}) \cap (d_{1,2}) = \emptyset$ .

*Доказательство.* Предположим, что  $K(A) \in (d_{1,1}) \cap (d_{1,2})$  и семейства  $\nu = (\nu_k)$  и  $\eta = (\eta_k)$  порождают соответственно  $d_1(K(A))$  и  $d_2(K(A))$ . Из определения 1 следует существование последовательности  $(m_j)$  такой, что

$m_j \in \cup_{j,k(j)} \cap \eta_j$  и  $k(j+1) > k(j)$ . По построению  $(m_j) \in d_2(K(A))$  (так как семейство  $\upsilon = (\upsilon_k)$  порождает  $d_1(K(A))$ ). Но это противоречит тому, что семейство  $\eta = (\eta_k)$  порождает  $d_2(K(A))$ .

Степенное пространство Кёте называют нерасщепляемым [7], если оно не имеет тип  $(d_j)$ ,  $j=1,2$ , и не изоморфно декартовому произведению пространств из  $(d_1)$  и  $(d_2)$ .

Из определения 1 и условий (3), (4) следует, что всякое нерасщепляемое СПК первого рода имеет тип  $(d_{1,1})$ . Примером пространств типа  $(d_{1,2})$  являются нерасщепляемые степенные пространства второго рода  $F(\mu, a)$  [10]. По определению СПК  $F(\mu, a) := \Phi_h(a)$  называют степенным пространством второго рода, если  $h_p(n) := -1/p + \min(\mu_n, p)$ ,  $\mu_n \geq 1$ . Из леммы 2, в частности, следует неизоморфность произвольных нерасщепляемых степенных пространств первого и второго рода.

Предположим, что пространства  $E(\lambda, a)$  и  $F(\mu, d)$  нерасщепляемые. Можно показать, что пространство  $E(\lambda, a) \otimes F(\mu, d)$  не принадлежит классам  $(d_{1,j})$ .

Неизвестно, существуют ли СПК, принадлежащие классам  $(d_{1,j})$  и не изоморфные СПК первого или второго рода.

4. Найдём условия, характеризующие СПК первого рода в классе всех СПК. Эти условия описываются в терминах абсолютно выпуклых подмножеств специального вида – центральных квазибочек (эти объекты были введены В.П. Захарютой в [11] (также [2])).

Квазибочкой в пространстве Фреше  $X$  называют замкнутое, абсолютно выпуклое подмножество  $B$  в  $X$  такое, что линейная оболочка, натянутая на это множество, есть всюду плотное в  $X$  векторное подпространство.

**Пример 3.** Пусть дана числовая последовательность  $\alpha = (\alpha_n)$  такая, что  $\alpha_n > 0$  для произвольного  $n$ . Тогда множество  $B_e(\alpha) := \left\{ x = (x_n) \in K(A) : \sum_{n=1}^{\infty} |x_n| \alpha_n \leq 1 \right\}$  будет квазибочкой в произвольном пространстве Кёте (квазибочки такого вида в дальнейшем будут называться базисными). Покажем, что  $B_e(\alpha') = B_e(\alpha'')$  тогда и только тогда, когда  $\alpha'_n = \alpha''_n$  для произвольного  $n$ . Другими словами, квазибочка  $B_e(\alpha)$  однозначно определяется последовательностью  $\alpha = (\alpha_n)$ .

Предположим, что  $B_e(\alpha') = B_e(\alpha'')$ , но  $\alpha'_{n_0} \neq \alpha''_{n_0}$  для некоторого  $n_0$ . Рассмотрим числовую последовательность  $(x_n)$  такую, что  $x_{n_0} = \alpha > 0$  и  $x_n = 0$  для всех  $n \neq n_0$ . При сделанном предположении число  $\alpha$  всегда можно выбрать так, что эта последовательность будет принадлежать только одной из заданных квазибочек. Обратное утверждение очевидно.

**Определение 2.** Пусть  $\tau \in (0,1)$ . Квазибочку  $B$  в пространстве Фреше  $X$  будем называть  $\tau$ -центральной, если

$$\forall p \exists q \exists C > 0 : \forall x \in X \quad \|x\|_p \leq C \|x\|_B^{1-\tau} \|x\|_q^\tau,$$

$$\forall p \exists q \exists C > 0 : \forall x' \in X' \quad \|x'\|_q \leq C \|x'\|_B^{1-\tau} (\|x'\|_p)^\tau.$$

Здесь  $B^\circ := \{x' \in X' : \forall x \in B \mid |x'(x)| \leq 1\}$  – поляр множества  $B$ ,  $\|x\|_B := \inf\{\lambda > 0 : x \in \lambda B\}$  (не исключается случай, когда  $\|x\|_B = \infty$ ).

Квазибочка  $B_e(\alpha)$  будет  $\tau$ -центральной в  $K(A)$  тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$\exists \tau \in (0,1) \forall p \exists q \exists C > 0 : \forall n \quad a_{p,n} \leq C \alpha_n^{1-\tau} a_{q,n}^\tau, \quad (5) \\ a_{q,n} \geq C^{-1} \alpha_n^{1-\tau} a_{p,n}^\tau.$$

Множество всех  $\tau$ -центральных базисных квазибочек в  $K(A)$  обозначим через  $QC_e(K(A); \tau)$ .

При  $\tau = 1/2$  определение  $\tau$ -центральной квазибочки совпадает с определением центральной квазибочки [11].

**Лемма 3.** Пусть  $X$  – СПК. Следующие условия равносильны:

- $X$  изоморфно СПК бесконечного типа;
- некоторая окрестность нуля в  $X$  является центральной квазибочкой;
- в  $X$  существует базис окрестностей нуля, состоящий из центральных квазибочек.

**Лемма 4.** Пусть  $X$  – СПК. Следующие условия равносильны:

- $X$  изоморфно СПК конечного типа;
- в  $X$  существует ограниченная центральная квазибочка;
- в  $X$  существует фундаментальная система ограниченных центральных квазибочек.

**Лемма 5.** Предположим, что множество натуральных чисел разбито на два непересекающихся подмножества  $\nu_0$  и  $\nu_1$ . Если квазибочка  $B_e(\alpha)$  такая, что  $B_e(\alpha, \nu_j) \in QC_e(X_{\nu_j})$  при  $j=0,1$ , то  $B_e(\alpha) \in QC_e(X)$ .

Следующее утверждение является обобщением доказанной в [4] характеристики СПК первого рода.

**Теорема 1.** Для произвольного СПК  $\Phi_h(a)$  равносильны условия:

- $\Phi_h(a)$  изоморфно СПК первого рода;
- $QC_e(\Phi_h(a); \tau) \neq \emptyset$  для произвольного  $\tau \in (0,1)$ .

**Следствие 1.** Для произвольного СПК  $\Phi_h(a)$  равносильны условия:

- в  $\Phi_h(a)$  существует центральная квазибочка;
- $\Phi_h(a)$  изоморфно дополняемому подпространству в  $E_0(a') \otimes E_\infty(a'')$  для подходящих последовательностей  $a' = (a'_n)$  и  $a'' = (a''_n)$ .

Импликация  $1 \Rightarrow 2$  следует из определения 2. Для доказательства обратного утверждения понадобится несколько вспомогательных утверждений.

Фиксируем произвольное  $\tau \in (0,1)$ . Пусть  $X = \Phi_h(a)$  – СПК такое, что  $QC_e(K(A); \tau) \neq \emptyset$ . Не ограничивая общности, можно считать, что  $B_e := B_e(\alpha) \in QC_e(K(A))$  (здесь  $\alpha_n = 1$  для всех  $n$ ). Из определения СПК и (5) следует, что в этом случае  $\forall p \exists q = q(p) \exists C : \exists n_0 \forall n > n_0,$   
 $C^{-1} \leq h_q(n) - h_p(n) \leq C,$  (6)  
 $h_p(n) - \tau h_q(n) \leq 0 \leq h_q(n) - \tau h_p(n).$

Для произвольного бесконечного множества индексов  $\nu = (n_k)$  положим

$$M_X(\nu) := \lim_{p \rightarrow +\infty} \overline{\lim}_{k \rightarrow +\infty} h_p(n_k).$$

**Лемма 6.** При сделанных предположениях справедливы следующие утверждения:

- $M_X(\nu) = 0$  для любой последовательности  $\nu \in d_2(X)$ ;
- $\forall \nu \in d_2(X) \forall \varepsilon > 0 \exists q \exists r \overline{\lim}_{n \in \nu} h_r(n) - \underline{\lim}_{n \in \nu} h_q(n) < \varepsilon.$

*Доказательство.* Покажем, что выполняется свойство 1. Для этого фиксируем произвольную последовательность  $(n_j) \in d_2(\Phi_h(a))$ . Из условия (6) следует, что  $\tau h_p(n_j) \geq h_p(n_j) - h_{q(p)}(n_j)$  и  $\tau h_{q(p)}(n_j) \leq h_{q(p)}(n_j) - h_p(n_j)$  для произвольного  $p$  и всех  $j$ , начиная с некоторого места. Искомое утверждение следует из доказанных неравенств и предложения 1.

Фиксируем произвольную последовательность  $\nu \in d_2(X)$ . Из свойства 1 следует, что для произвольного  $\varepsilon > 0$  существует  $q$  такое, что  $\overline{\lim}_{n \in \nu} h_p(n) - \underline{\lim}_{n \in \nu} h_q(n) \leq M_X(\nu) - (M_X(\nu) - \varepsilon) = \varepsilon$  для любого  $p$ .

**Лемма 7.** Квазибочка  $B_e(\beta)$  тогда и только тогда является  $\tau$ -центральной в  $X$ , когда выполняются условия:

- $\exists C > 0 \forall n \quad -Ca_n \leq \ln(\beta_n) \leq Ca_n;$
- $\forall \nu \in d_2(X) \quad \lim_{n \in \nu, n \rightarrow +\infty} \frac{\ln(\beta_n)}{a_n} = 0.$

Определим для базисных квазибочек характеристики, аналогичную  $d_j(X)$ .

Подмножество локально выпуклого пространства называют ограниченным, если оно поглощается каждой окрестностью нуля этого пространства.

**Определение 3.** Пусть  $B_e(\beta)$  – квазибочка в пространстве Кёте  $K(A)$ . Тогда семейство  $\Lambda_1(\beta, K(A))$  (соответственно  $\Lambda_2(\beta, K(A))$ ) состоит из всех бесконечных последовательностей индексов  $\nu = (n_k)$ , для которых множество  $B_e(\beta) \cap K(A; \nu)$  является окрестностью нуля в  $K(A; \nu)$  (соответственно ограниченным подмножеством в  $K(A; \nu)$ ).

Из определения 3 следует, что

$$\nu = (n_k) \in \Lambda_1(\beta, K(A)) \Leftrightarrow \exists p \exists C > 0 : \forall n \quad \beta_{n_k} \leq Ca_{p, n_k},$$

$$\nu = (n_k) \in \Lambda_2(\beta, K(A)) \Leftrightarrow \forall p \exists C > 0 : \forall n \quad \beta_{n_k} \geq Ca_{p, n_k}.$$

**Лемма 8.** Если  $B_e(\beta) \in QC_e(X, \tau)$ , то  $\Lambda_j(\beta, X) = d_j(X)$ ,  $j = 1, 2$ . Если, кроме того,  $X$  нерасщепляемо, то существует семейство  $(\nu_k)_{k=1}^\infty$  попарно непересекающихся подмножеств во множестве  $N$  натуральных чисел такое, что  $N = \bigcup_{k=1}^\infty \nu_k$  и  $\nu \in \Lambda_1(\beta, X)$  тогда и только тогда, когда  $\nu \subset \nu_1 \cup \dots \cup \nu_k$  для некоторого  $k$ .

**Теорема 2.** Пусть  $X$  и  $Y$  – пара пространств Кёте, в которых существуют центральные квазибочки. Если  $d_j(X) = d_j(Y)$ ,  $j = 1, 2$ , и  $QC_e(X; \tau) = QC_e(Y; \tau)$ , то  $Q_e^{(j)}(X) = Q_e^{(j)}(Y)$ ,  $j = 1, 2$ .

Говорят, что пространства Кёте  $K(A)$  и  $K(B)$  диагонально изоморфны, и пишут  $K(A) \overset{\ddot{a}}{\cong} K(B)$ , если существует изоморфизм  $T : K(A) \rightarrow K(B)$  такой, что  $Te_n = t_n e_n$  для подходящей числовой последовательности  $(t_n)$ .

**Следствие 2.** Пусть  $K(A)$  и  $K(B)$  – СПК, в которых существует центральная квазибочка. Следующие условия равносильны:

- I.  $K(A) \overset{\ddot{a}}{\cong} K(B)$ .

II.  $d_j(K(A)) = d_j(K(B)), j = 1, 2,$

$$QC_e(K(A); \tau) = QC_e(K(B); \tau).$$

В теореме 2 и в условии II следствия 2 квазибочка  $B^e(\beta)$  отождествляется с положительной последовательностью  $\beta = (\beta_n)$ . Это означает, что равенство  $QC_e(X; \tau) = QC_e(Y; \tau)$  понимается в следующем смысле:  $B^e(\gamma) \in QC_e(X) \Leftrightarrow B^e(\gamma) \in QC_e(Y)$  для произвольной положительной числовой последовательности  $\gamma = (\gamma_n)$ .

Теперь можно завершить доказательство теоремы 1. Данное пространство либо принадлежит одному из классов пространств  $(d_j)$ , либо представимо в виде декартового произведения пространств типа  $(d_1)$  и  $(d_2)$ , либо нерасщепляемо. В первых двух случаях оно изоморфно СПК конечного или бесконечного типов либо декартовому произведению СПК конечного и бесконечного типов, т.е. некоторому СПК первого рода.

Предположим, что данное пространство нерасщепляемо. Из леммы 6 следует, что  $X \in (d_{1,1})$ .

Пусть семейство  $(\upsilon_s)_{s=1}^\infty$  порождает  $d_1(X)$ . Рассмотрим пространство  $E(\lambda, a)$ , в котором  $\lambda_n = s^{-1}$ , как только  $n \in \upsilon_s$ . Из лемм 3–7 и теоремы 2 следует, что  $d_j(X) = d_j(Y), j = 1, 2, QC_e(X; \tau) = QC_e(Y; \tau)$ . Но тогда в силу следствия 1 пространства  $X$  и  $E(\lambda, a)$  диагонально изоморфны.

Таким образом, данное СПК в любом случае изоморфно подходящему СПК первого рода. Теорема доказана.

5. В этом разделе будут изучаться внутренние интерполяционные свойства СПК первого рода. По определению внутренние интерполяционные свойства пространств Фреше описываются в терминах подходящего интерполяционного функтора (определённого в категории интерполяционных пар или интерполяционных семейств банаховых пространств). Этот функтор применяется к паре или семейству пространств из проективного спектра банаховых пространств, определяющих рассматриваемое пространство. Будет найдено внутреннее интерполяционное свойство, характеризующее СПК первого рода в классе всех СПК. Это свойство описывается в терминах вещественной интерполяции. Определение этого метода (и другие необходимые понятия из теории интерполяции линейных операторов) цитируется по [12].

**Определение 4.** Пусть  $\bar{X} = [X_0, X_1]$  – интерполяционная пара банаховых пространств. Для фиксированных  $p \in [1, \infty], \tau \in (0, 1)$  пространство

$\bar{X}_{\tau, p} = (X_0, X_1)_{\tau, p}$  состоит из всех  $x \in X_0 + X_1$ , для которых конечна норма  $\|\cdot\|_{\tau, p}$ :

$$\|x\|_{\tau, p} := \begin{cases} \left( \int_0^{+\infty} [t^{-\tau} K(t, x; X_0, X_1)]^p \frac{dt}{t} \right)^{1/p}, & p \in [1, \infty) \\ \sup_{t>0} t^{-\tau} K(t, x; X_0, X_1) & p = \infty \end{cases}.$$

Здесь  $K(t, x, X_0, X_1) := \inf\{\|x_0\|_{X_0} + t\|x_1\|_{X_1} : x = x_0 + x_1, x_j \in X_j\}$

$\|\cdot\|_{X_j}$  – норма в  $X_j$ .

Известно [12], что пространство  $\bar{X}_{\tau, p} = (X_0, X_1)_{\tau, p}$  является банаховым, промежуточным и интерполяционным между  $X_0$  и  $X_1$ .

Для произвольной положительной последовательности  $a = (a_n)$  через  $l_p(a)$  (при  $p \in [1, \infty)$ ) обозначим множество всех числовых последовательностей  $x = (x_n)$ , для которых конечна норма

$$\|\cdot\|_{l_p(a)} : \|x\|_{l_p(a)} := \left[ \sum_{n=1}^{+\infty} (|x_n| a_n)^p \right]^{1/p}.$$

**Предложение 2** [12, теорема 1.18.1]. Пусть даны положительные числовые последовательности  $a^{(0)} = (a_n^{(0)})$  и  $a^{(1)} = (a_n^{(1)})$ . Если  $p \in [1, \infty)$ , то  $(l_p(a^{(0)}), l_p(a^{(1)}))_{\tau, p} = l_p(a^{(\tau)})$ , где  $a_n^{(\tau)} := (a_n^{(0)})^{1-\tau} (a_n^{(1)})^\tau$ .

**Определение 5.** Пусть  $X$  – пространство Фреше, топология в котором определяется набором норм  $(\|\cdot\|_p)$ . Будем говорить, что пространство  $X$  имеет тип  $(C_{1,1})_q$  (где  $q \in [1, +\infty)$ ) и писать  $X \in (C_{1,1})_q$ , если

$$\exists \gamma \in (0, 1/2) \exists \varphi : N \rightarrow N \forall p \forall r : \quad (X_p, X_r)_{\gamma, q} \supset (X_{\varphi(p)}, X_{\varphi(r)})_{1-\gamma, q}. \quad (7)$$

В частности,  $(C_{1,1}) := (C_{1,1})_1$ .

Из предложения 2 следует, что для пространства Кёте  $K(A)$  условие (7) эквивалентно условию

$$\exists \gamma \in (0, 1/2) \exists \varphi : N \rightarrow N \forall p \forall r \exists C = C(p, r) \forall n :$$

$$a_{p,n}^{1-\gamma} a_{r,n}^\gamma \leq C(p, r) a_{\varphi(p),n}^\gamma a_{\varphi(r),n}^{1-\gamma}.$$

Заметим, что всякое пространство Кёте типа  $(C_{1,1})$  либо расщепляемо, либо содержится в  $(b_{1,1})$ .

**Теорема 3.** Класс пространств  $(C_{1,1})_q$  является идеалом пространств Фреше в смысле А. Пича [13, определения 2.1.1 и 29.2.1]. Другими словами, выполняются следующие условия:

– всякое конечномерное пространство содержится в  $(C_{1,1})$ ;

– если  $X \in (C_{1,1})$  и пространство Фреше  $Y$  изоморфно дополняемому подпространству в  $X$ , то  $Y \in (C_{1,1})$ ;

– если  $X, Y \in (C_{1,1})$ , то  $X \times Y \in (C_{1,1})$ .

**Теорема 4.** Для произвольного СПК  $X$  равносильны условия:

–  $X$  изоморфно подходящему СПК первого рода;

–  $X$  изоморфно дополняемому подпространству в  $E_0(a) \otimes E_\infty(d)$  для подходящих положительных числовых последовательностей  $a = (a_n)$  и  $b = (d_n)$ ;

–  $X \in (C_{1,1})$ .

### Литература

1. Шагинян Т.Б. Об одном классе пространства Кёте // Теория функций, дифференциальные операторы и их приложения. Элиста, 1976. С. 128–137.
2. Шубарин М.А. Изоморфизмы степенных пространств: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ростов н/Д., 1994. 117 с.
3. Шубарин М.А. Классы пространств, порожденные интерполяцией диагональных операторов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2006. № 1. С. 24–26.
4. Драгилев М.М. Базисы в пространствах Кёте. Ростов н/Д., 2003. 143 с.
5. Митягин Б.С. Аппроксимативная размерность и базисы в ядерных пространствах // Успехи мат. наук. 1961. Т. 16, вып. 4. С. 63–132.
6. Захарюта В.П. Некоторые линейные топологические инварианты и изоморфизм тензорных произведений центров шкал // Изв. СКНЦ ВШ. Естеств. науки. 1974. № 4. С. 62–64.
7. Vogt D. Charakterisierung der Unterraume von  $s$  // Math. Z., 1977. Vol. 155. P. 109–117.
8. Vogt D., Wagner M.J. Charakterisierung der Quotientenraume von  $s$  und eine Vermutung von Martinean // Studia Math. 1980. Vol. 67. P. 225–240.
9. Драгилев М.М. О специальных размерностях, определенных на некоторых классах пространств Кёте // Мат. сб. 1969. № 80, т. 2. С. 225–240.
10. Zachriuta V.P. Linear topological invariants and their application to isomorphic classification of generalized power spaces // Turk. Math. J. 1996. Vol. 20, № 1. P. 237–289.
11. Захарюта В.П. Критерий квазиэквивалентности базисов в ядерных пространствах // XI Всесоюзная школа по теории операторов в функциональных пространствах,

Челябинск, 26–30 мая 1986. Ч. I. Челябинск, 1986. С. 106.

12. Трибель Х. Теория интерполяции. Функциональные пространства. Диф. операторы. М., 1980. 664 с.
13. Пич А. Операторные идеалы. М., 1983. 664 с.

### References

1. Shaginyan T.B. [A class of Kothe space]. *Teoriya funktsii, differentsial'nye operatory i ikh prilozheniya* [The theory of functions, differential operators and their applications]. Elista, 1976, pp. 128-137.
2. Shubarin M.A. *Izomorfizmy stepennykh prostranstv*: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Isomorphisms power spaces]. Rostov-on-Don, 1994, 117 p.
3. Shubarin M.A. Klassy prostranstv, porozhdaemye interpolatsiei diagonal'nykh operatorov [Classes spaces generated by interpolating diagonal operators]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 2006, no 1, pp. 24-26.
4. Dragilev M.M. *Bazisy v prostranstvakh Kete* [Bases in spaces of Kothe]. Rostov-on-Don, 2003, 143 p.
5. Mityagin B.S. *Approksimativnaya razmernost' i bazisy v yadernykh prostranstvakh* [Approximate dimension and bases in nuclear spaces]. *Uspekhi mat. nauk*, 1961, vol. 16, no 4, pp. 63-132.
6. Zakharyuta V.P. Nekotorye lineinye topologicheskie invarianty i izomorfizm tenzornykh proizvedenii tse ntrov shkal [Some linear topological invariants of the isomorphism of tensor products scales centers]. *Izv. SKNTs VSh. Estestv. nauki*, 1974, no 4, pp. 62-64.
7. Vogt D. Charakterisierung der Unterraume von  $s$ . *Math. Z.*, 1977, vol. 155, pp. 109-117.
8. Vogt D., Wagner M.J. Charakterisierung der Quotientenraume von  $s$  und eine Vermutung von Martinean. *Studia Math.*, 1980, vol. 67, pp. 225-240.
9. Dragilev M.M. O spetsial'nykh razmernostyakh, opredelennykh na nekotorykh klassakh prostranstv Kete [On special dimensions defined on some classes of Kothe spaces]. *Mat. sb.*, 1969, no 80, vol. 2, pp. 225-240.
10. Zachriuta V.P. Linear topological invariants and their application to isomorphic classification of generalized power spaces. *Turk. Math. J.*, 1996, vol. 20, no 1, pp. 237-289.
11. Zakharyuta V.P. [Criterion quasiequivalence bases in nuclear spaces]. *XI Vsesoyuznaya shkola po teorii operatorov v funktsional'nykh prostranstvakh* [XI All-Union school on theory of operators in functional spaces]. Chelyabinsk, May 26-30, 1986. Part I. Chelyabinsk, 1986, p. 106.
12. Tribel' Kh. Teoriya interpolatsii. Funktsional'nye prostranstva. Dif. operatory [Interpolation theory. Functional spaces. Diff. operators]. Moscow, 1980, 664 p.
13. Pich A. *Operatornye idealy* [Operator ideals]. Moscow, 1983, 664 p.



## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 577.121

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-31-35

СВОБОДНОРАДИКАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ И АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС  
У RATTUS NORVEGICUS ПРИ СОЧЕТАННОМ ВЛИЯНИИ ТРАВМЫ  
И МОДЕЛЬНОЙ ГИПЕРГОМОЦИСТЕИНЕМИИ

© 2016 г. И.А. Аллилуев, Е.М. Вечканов, И.А. Сорокина, Ю.Н. Калюжная, В.В. Внуков

Аллилуев Илья Александрович – аспирант, кафедра биохимии и микробиологии, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: alliluev@sfnu.ru

Вечканов Евгений Михайлович – кандидат биологических наук, доцент, кафедра биохимии и микробиологии, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: emvechkanov@sfnu.ru

Сорокина Ирина Алексеевна – кандидат биологических наук, доцент, кафедра биохимии и микробиологии, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: iasorokina@sfnu.ru

Калюжная Юлия Николаевна – аспирант, кафедра биохимии и микробиологии, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: yuliyakalyuzhnaya@mail.ru

Внуков Валерий Валентинович – кандидат биологических наук, профессор, кафедра биохимии и микробиологии, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: vvvnukov@sfnu.ru

Alliluev Ilya Aleksandrovich – Post-Graduate Student, Department of Biochemistry and Microbiology, Ivanovskii Academy of Biology and Biotechnology of the Southern Federal University, Stachky Ave, 194/1, 344090, Russia, e-mail: alliluev@sfnu.ru

Vechkanov Evgenii Mikhailovich – Candidate of Biological Science, Associate Professor, Department of Biochemistry and Microbiology, Ivanovskii Academy of Biology and Biotechnology of the Southern Federal University, Stachky Ave, 194/1, 344090, Russia, e-mail: emvechkanov@sfnu.ru

Sorokina Irina Alekseevna – Candidate of Biological Science, Associate Professor, Department of Biochemistry and Microbiology, Ivanovskii Academy of Biology and Biotechnology of the Southern Federal University, Stachky Ave, 194/1, 344090, Russia, e-mail: iasorokina@sfnu.ru

Kalyuzhnaya Yuliya Nikolaevna – Post-Graduate Student, Department of Biochemistry and Microbiology, Ivanovskii Academy of Biology and Biotechnology of the Southern Federal University, Stachky Ave, 194/1, 344090, Russia, e-mail: yuliyakalyuzhnaya@mail.ru

Vnukov Valerii Valentinovich – Candidate of Biological Science, Professor, Department of Biochemistry and Microbiology, Ivanovskii Academy of Biology and Biotechnology of the Southern Federal University, Stachky Ave, 194/1, 344090, Russia, e-mail: vvvnukov@sfnu.ru

Исследованы интенсивность продукции активных форм кислорода, скорость окисления липидов в плазме крови крыс и активность супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы в печени животных при травме на фоне гипергомоцистеинемии. Показано увеличение интенсивности продукции активных форм кислорода наряду с растущей антиоксидантной активностью плазмы крови крыс с 3-х по 14-е сут после причинения механических повреждений на фоне гипергомоцистеинемии. Выявлена обратная корреляционная зависимость между активностью СУА и каталазы.

**Ключевые слова:** умеренная гипергомоцистеинемия, травма опорно-двигательного аппарата, тромбофилия, хемилюминесценция, окислительный стресс.

Studied the intensity of the production of reactive oxygen species, the rate of lipid oxidation in rat plasma and the activity of SOD and catalase in the liver of animals in trauma on the background of hyperhomocysteinemia. The increase rate of production of reactive oxygen species, along with increasing the antioxidant activity of rat plasma with a third at the 14th day after the occurrence of mechanical damage to the background hyperhomocysteinemia. There was an inverse correlation between the activity of catalase and SRA.

**Keywords:** medium hyperhomocysteinemia, trauma of the musculoskeletal system, thrombophilia, chemiluminescence, oxidative stress.

Травма и оперативные вмешательства приводят к генерализованным повреждениям эндотелия сосудов и сдвигу системы гемостаза в сторону гиперкоагуляции, что увеличивает вероят-

ность тромбоэмболических осложнений. С другой стороны, немаловажную роль в патогенезе сердечно-сосудистых заболеваний играют нарушения метаболизма гомоцистеина, являясь одним

из независимых факторов тромбофилии и дисфункции эндотелия, в том числе за счет развития окислительного стресса, окислительной модификации липидов и белков, изменения продукции антиоксидантных ферментов [1–6]. В научной литературе мало представлены исследования, направленные на биохимическую оценку интенсивности свободнорадикальных процессов и состояния антиоксидантных ферментов при сочетанном травматическом воздействии на организм на фоне уже существующей умеренной гипергомоцистеинемии. В этой связи целью нашего исследования явилось изучение особенностей свободнорадикального окисления и функционирования антиоксидантных ферментов в тканях крыс на 3-й, 7-е и 14-е сут при травме опорно-двигательного аппарата в условиях умеренной экспериментальной гипергомоцистеинемии.

## Материалы и методы

Эксперимент выполнен на 64 белых крысах-самцах *Rattus norvegicus* массой 250÷300 г в возрасте 6 мес. с учетом этических принципов экспериментирования на животных. Содержание животных осуществлялось в стандартных клетках в условиях 12-часового режима освещения и свободного доступа к корму и воде. Животные были рандомизированы на 8 групп по 8 особей в каждой: 1-я – интактные животные; 2–4-я – животным формировали закрытый перелом костей голени и выводили из эксперимента через 3, 7 и 14 сут; 5-я – животным в течение 30 сут ежедневно вводили метионин, после чего выводили из эксперимента; 6-я, 7-я и 8-я – животным в течение 30 сут ежедневно вводили метионин, формировали закрытый перелом костей голени, продолжая вводить метионин, и выводили из эксперимента через 3, 7 и 14 сут (таблица).

### Дизайн эксперимента

Группа	Количество дней, в течение которых вводили метионин	Формирование перелома на 30-е сут от начала эксперимента	Взятие биологического материала после травмы		
			на 3-й сут (33-й день эксперимента)	на 7-е сут (37-й день эксперимента)	на 14-е сут (44-й день эксперимента)
			Число особей		
1	–	–		8	
2	–	+	8		
3	–	+		8	
4	–	+			8
5	30+7	–		8	
6	30+3	+	8		
7	30+	+		8	
8	30+14	+			8

Индукцию гипергомоцистеинемии у крыс осуществляли путем ежедневного зашпечного введения 1%-го раствора L-метионина в дистиллированной воде из расчета 0,04 г/100 г веса крысы в сутки [6]. Нанесение травмы проводилось под наркозом с использованием золетила в концентрации 5 мг/100 г с помощью специально разработанного механического устройства [7]. После окончания срока эксперимента животных декапитировали под наркозом с использованием золетила в концентрации 5 мг/100 г. В качестве биологического материала использовали плазму крови, полученную из гепаринизированной крови, и гомогенат ткани печени. Ткань печени гомогенизировали на холоде в буфере, содержащем 50 мМ Tris-HCl pH 7,4 с добавлением до конечной концентрации 0,1 % TritonX100. Содержание гомоцистеина в плазме крови определяли с использованием набора реагентов Immulite 2000XPI (Siemens Healthcare Diagnostics, Германия). Интенсивность продукции активных форм кислорода (АФК) в плазме крови лабораторных животных регистрировали флуорометрически при

$\lambda_{ex} = 488$  нм и  $\lambda_{em} = 524$  нм, используя 2',7'-Dichlorofluorescein (DCFH) на спектрофлуориметре RF-5301 Shimadzu (Япония) [8]. Хемилюминесценцию (ХЛ) плазмы крови проводили в системе гемоглобин –  $H_2O_2$  – люминол на хемилюминометре SmartLum 5773 (Россия) [9], АОА представляли в виде концентрации эквивалентного раствора аскорбата (аскорбатный эквивалент, мМ), а скорость окисления липидов (СОЛ) – по тангенсу угла наклона левого плеча медленной вспышки ХЛ ( $tg \alpha$ ). Интенсивность свободнорадикального окисления липидов определяли по содержанию его молекулярных продуктов: диеновых конъюгатов (ДК) [10], малонового диальдегида (МДА) [11] и шиффовых оснований (ШО) [12]. Общие липиды экстрагировали по методу Bligh [13]. Определение общего белка осуществляли методом Lowry в модификации Schacterle – Pollack [14]. Для измерения активности супероксиддисмутазы (СОД) применяли спектрофотометрический анализ конкурентного ингибирования СОД в условиях генерации супероксидного анион-радикала при аутоокислении ад-

ренилина в адренохром [15]. Активность каталазы (КАТ) определяли спектрофотометрически по убыли субстрата ( $H_2O_2$ ), способного образовывать с молибдатом аммония стойкий окрашенный комплекс [16]. Для оценки статистически значимых различий между сравниваемыми группами использовали параметрический критерий Стьюдента. Оценку соответствия типа распределения выборки нормальному проводили с использованием метода трех сигм. Разницу средних величин считали достоверной при  $p < 0,05$ .

### Результаты исследования и обсуждение

Адекватность моделирования умеренной гипергомоцистеинемии нами показана по содержанию гомоцистеина в плазме крови исследуемых групп животных. В контрольной группе крыс средний уровень гомоцистеина в плазме крови составил  $7 \pm 0,3$  мкмоль/л, во 2–4-й группах средняя его концентрация составила  $8 \pm 1,2$  мкмоль/л, в 5–8-й –  $47 \pm 1,6$  мкмоль/л, что достоверно выше значений контрольной группы в 4 раза и соответствует гипергомоцистеинемии средней тяжести.

Повышенный уровень гомоцистеина в плазме крови опосредует гиперпродукцию реакционноспособных метаболитов кислорода, приводя к окислительному стрессу. Активные формы кислорода и азота оказывают выраженное негативное воздействие на эндотелиальную регуляцию сосуди-

стого тонуса, систему тромбогенеза и коагуляции крови [2–4, 17]. В связи с этим представляется важным определение интенсивности продукции АФК и уровня антиоксидантной активности (АОА) в плазме крови при травме на фоне гипергомоцистеинемии с привлечением флуоресцентного и хемилюминесцентного методов анализа. На рис. 1 представлены обобщённые данные (% изменения относительно контроля) по интенсивности продукции АФК, уровню АОА и  $tg\alpha$  в плазме крови крыс в ходе эксперимента.

Интенсивность продукции АФК у животных с травмой опорно-двигательного аппарата (2–4-я группы) и ее сочетанием с умеренной гипергомоцистеинемией (6–8-я группы) имеет тенденцию к увеличению, при этом в 4-й и 8-й группах данный показатель статистически значимо отличается от контроля на 83,9 и 94,5 % соответственно. АОА плазмы крови также увеличивается с течением времени после формирования травмы (2–4-я группы) и травмы на фоне повышенного содержания гомоцистеина (6–8-я группы) и достигает максимума в 86,7 (4-я) и 155,1 % (8-я группа) на 14-й день после нанесения травмы. Наблюдается обратная зависимость между уровнем АОА в плазме крови крыс и СОЛ, что выражается в достоверном снижении угла  $\alpha$  в плазме крови исследуемых групп животных при травме и травме на фоне умеренной гипергомоцистеинемии на 32,9 % в 4-й группе и на 29,7 – в 8-й.

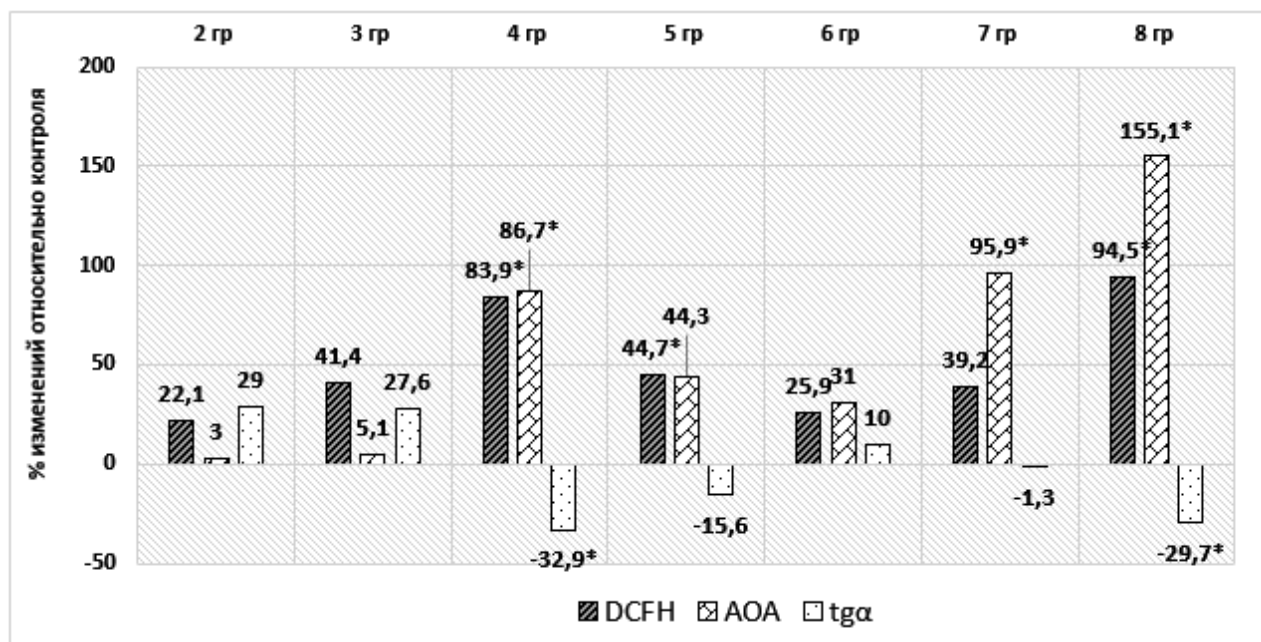


Рис. 1. Изменения относительно контроля интенсивности продукции АФК, АОА и СОЛ в плазме крови крыс в ходе эксперимента; \* – достоверные изменения ( $p < 0,05$ )

Интенсификация свободнорадикальных процессов неизбежно приводит к инициации и развитию цепного процесса свободнорадикального окисления липидов, способствуя накоплению его молекулярных продуктов. Нами определен уровень содержания первичных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) – ДК, вторичного молекулярного продукта – МДА, конечных продуктов – ШО, а также активность СОД и КАТ в печени исследованных крыс (рис. 2).

Об интенсивности протекания окислительного стресса при механической травме можно судить по накоплению продуктов ПОЛ и по состоянию анти-

оксидантной системы. В группе животных с повреждением опорно-двигательного аппарата на 3-и, 7-е и 14-е сут в печени наблюдается резкое повышение уровня МДА на 33, 15 и 66 % без статистически значимого изменения уровня ДК и ШО. Активность СОД в печени снижена на всём протяжении исследования на 25, 23 и 15 % соответственно на фоне значительного роста активности КАТ на 7-е (74,3) и 14-е (41,5 %) сут эксперимента. Несомненно, травматическое воздействие приводит к развитию окислительного стресса, осложнённого рассогласованием в работе сопряжённых ферментов СОД и КАТ.

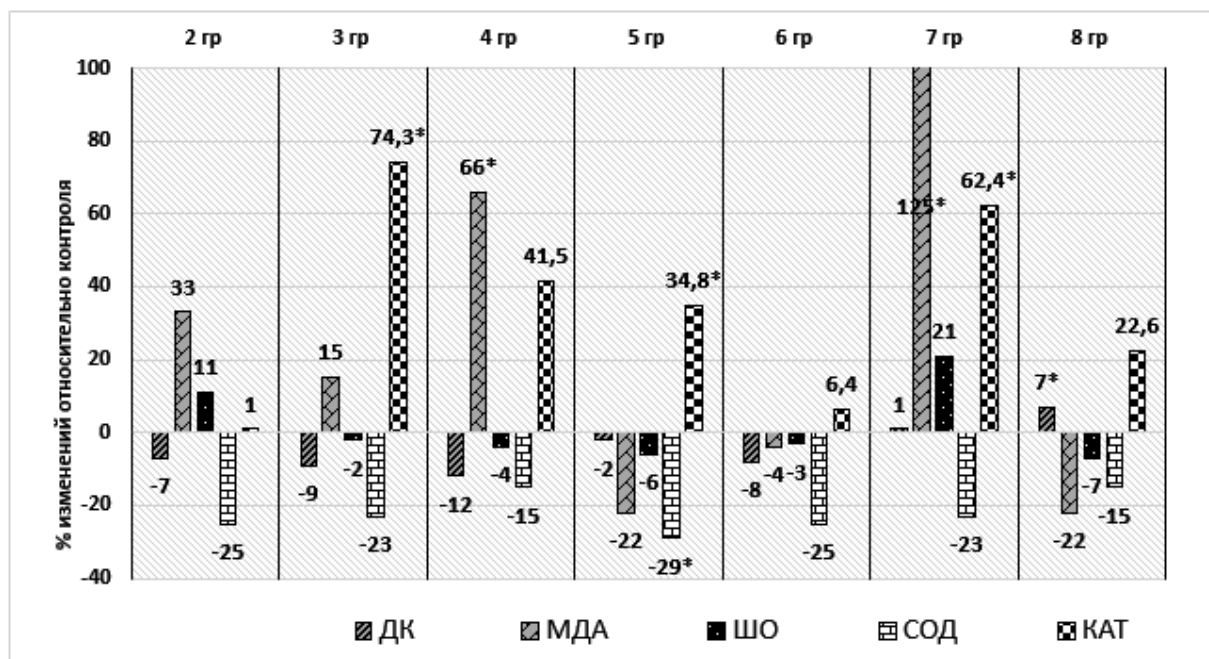


Рис. 2. Изменения относительно контроля интенсивности свободнорадикального окисления липидов по уровню продукции ДК, МДА и ШО и активность СОД и КАТ; \* – достоверные изменения ( $p < 0,05$ )

В печени животных с умеренной гипергомоцистеинемией (5-я группа) не отмечено статистически значимого увеличения продуктов ПОЛ, возможно, из-за повышенной активности КАТ (34,8 % по отношению к контрольной группе).

### Заключение

Таким образом, окислительный стресс при травме на фоне гипергомоцистеинемии на 7-е сут достигает пика своей выраженности при недостаточной работе основного регулятора процесса свободнорадикального окисления – фермента СОД на фоне выраженной активности КАТ. Спустя две недели после травмы отмечается некоторая нормализация параметров процессов ПОЛ, выраженная в снижении МДА и ШО, что предположительно свя-

зано с изменением уровня антиоксидантов, повышающих АОА.

### Литература

1. Brattstrom L., Wilcken D.E. Homocysteine and cardiovascular disease: cause or effect? // Am. J. Clin. Nutr. 2000. Vol. 72. P. 315–323.
2. Болдырев А.А. Молекулярные механизмы токсичности гомоцистеина // Биохимия. 2009. Т. 74, вып. 6. С. 725–736.
3. Кураян К.М., Березовский Д.П., Микашинович З.И. Особенности окислительного стресса и морфометрические показатели сосудов микроциркуляторного русла при экспериментальной умеренной гомоцистеинемии // Валеология. 2012. № 3. С. 7–12.
4. Kolling J., Scherer E., da Cunha A. Homocysteine induces oxidative-nitrative stress in heart of rats: prevention by folic acid // Cardiovasc. Toxicol. 2011. Vol. 11, № 1. P. 67–73.

5. Tousoulis D., Bouras G., Antoniadis C. The activation of endothelin-1 pathway during methionine-induced homocysteinemia mediates endothelial dysfunction in hypertensive individuals // *J. Hypertens.* 2010. Vol. 28, № 5. P. 925–930.
6. Dayal S., Lentz S.R. Murine Models of Hyperhomocysteinemia and their Vascular Phenotypes // *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 2008. Vol. 28, № 9. P. 1596–1605.
7. Березовский Д.П., Мажугин В.Ю., Кураян К.М., Кураян М.Б., Крайнова Н.Н., Хабарова О.В., Варавва Т.А., Корниенко И.В. Экспериментальная модель умеренной гипергомоцистеинемии для изучения патогенеза тромботических осложнений при травме опорно-двигательного аппарата // *Кубанский науч. мед. вестн.* 2011. № 5. С. 21–24.
8. Cathcart R., Schwierts E., Ames B.N. Detection of picomole levels of hydroperoxides using a fluorescent dichlorofluorescein assay // *Anal. Biochem.* 1983. Vol. 134. P. 111–116.
9. Тесёлкин Ю.О., Бабенкова И.В., Любичский О.Б., Клебанов Г.И., Владимиров Ю.А. Определение антиоксидантной активности плазмы крови с помощью системы гемоглобин – пероксид водорода – люминол // *Вопросы мед. химии.* 1998. Т. 44, № 1. С. 70–76.
10. Стальная И.Д. Метод определения диеновой конъюгации ненасыщенных жирных кислот // *Современные методы в биохимии.* М., 1977. С. 63–64.
11. Стальная И.Д., Горшвили Т.Г. Метод определения малонового диальдегида с помощью тиобарбитуровой кислоты // *Современные методы в биохимии.* М., 1977. С. 66–68.
12. Bidlack W.R., Tappel A.L. Fluorescent products of phospholipids during lipid peroxidation // *Lipids.* 1973. Vol. 68, № 4. P. 203–209.
13. Bligh E.J., Dyer W.J. Rapid methods of total lipid extraction and purification // *Can. J. Biochem. Physiol.* 1959. Vol. 37, № 8. P. 911–917.
14. Shacterle G.R., Pollack R.L. A simplified method for the quantitative assay of small amounts of protein in biological material // *Anal. Biochem.* 1973. Vol. 51. P. 654–655.
15. Сирота Т.В. Новый подход в исследовании процесса аутоокисления адреналина и использования его для измерения активности супероксиддисмутазы // *Вопросы мед. химии.* 1999. № 3. С. 14 – 15.
16. Корольюк М.А., Иванова Л.И., Майорова И.Г., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // *Лаб. дело.* 1988. № 1. С. 16–19.
17. Zgraham I.M., Daly L.E., Refsum H.M. Plasma homocysteine as a risk factor for vascular disease // *The Eur. Conc. Act. Rep. JAMA.* 1997. Vol. 277. P. 1775–1781.
4. Kolling J., Scherer E., da Cunha A. Homocysteine induces oxidative-nitrative stress in heart of rats: prevention by folic acid. *Cardiovasc. Toxicol.*, 2011, vol. 11, no 1, pp. 67-73.
5. Tousoulis D., Bouras G., Antoniadis C. The activation of endothelin-1 pathway during methionine-induced homocysteinemia mediates endothelial dysfunction in hypertensive individuals. *J. Hypertens.*, 2010, vol. 28, no 5, pp. 925-930.
6. Dayal S., Lentz S.R. Murine Models of Hyperhomocysteinemia and their Vascular Phenotypes. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.*, 2008, vol. 28, no 9, pp. 1596-1605.
7. Berезovskii D.P., Mazhugin V.Yu., Kurayan K.M., Kurayan M.B., Krainova N.N., Khabarova O.V., Varavva T.A., Kornienko I.V. Eksperimental'naya model' umerennoi giperhomotsisteinemii dlya izucheniya patogeneza tromboticheskikh oslozhenii pri travme oporno-dvigatel'nogo apparata [The experimental model of moderate hyperhomocysteinemia for the study of the pathogenesis of thrombotic complications after trauma of the musculoskeletal system]. *Kubanskii nauch. med. vestn.*, 2011, no 5, pp. 21-24.
8. Cathcart R., Schwierts E., Ames B.N. Detection of picomole levels of hydroperoxides using a fluorescent dichlorofluorescein assay. *Anal. Biochem.*, 1983, vol. 134, pp. 111-116.
9. Teselkin Yu.O., Babenkova I.V., Lyubitskii O.B., Klebanov G.I., Vladimirov Yu.A. Opredelenie antioksidantnoi aktivnosti plazmy krovi s pomoshch'yu sistema gemoglobin – peroksid vodoroda – lyuminol [Determination of the antioxidant activity of blood plasma through a system hemoglobin - hydrogen peroxide - luminol]. *Voprosy med. khimii*, 1998, vol. 44, no 1, pp. 70-76.
10. Stal'naya I.D. [Method for determination of conjugated diene unsaturated fatty acids]. *Sovremennye metody v biokhimi* [Modern methods in biochemistry]. Moscow, 1977, pp. 63-64.
11. Stal'naya I.D., Gorishvili T.G. [Method for determination of malondialdehyde via thiobarbituric acid]. *Sovremennye metody v biokhimi* [Modern methods in biochemistry]. Moscow, 1977, pp. 66-68.
12. Bidlack W.R., Tappel A.L. Fluorescent products of phospholipids during lipid peroxidation. *Lipids*, 1973, vol. 68, no 4, pp. 203-209.
13. Bligh E.J., Dyer W.J. Rapid methods of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*, 1959, vol. 37, no 8, pp. 911-917.
14. Shacterle G.R., Pollack R.L. A simplified method for the quantitative assay of small amounts of protein in biological material. *Anal. Biochem.*, 1973, vol. 51, pp. 654–655.
15. Sirota T.V. Novyi podkhod v issledovanii protessa autookisleniya adrenalina i ispol'zovaniya ego dlya izmereniya aktivnosti superoksiddismutazy [A new approach to the study of auto-oxidation process of adrenaline and use it to measure the activity of superoxide dismutase]. *Voprosy med. khimii*, 1999, no 3, pp. 14-15.
16. Korolyuk M.A., Ivanova L.I., Maiorova I.G., Tokarev V.E. Metod opredeleniya aktivnosti katalazy [The method for determining the activity of catalase]. *Lab. delo*, 1988, no 1, pp. 16-19.
17. Zgraham I.M., Daly L.E., Refsum H.M. Plasma homocysteine as a risk factor for vascular disease. *The Eur. Conc. Act. Rep. JAMA*, 1997, vol. 277, pp. 1775-1781.

#### References

1. Brattstrom L., Wilcken D.E. Homocysteine and cardiovascular disease: cause or effect? *Am. J. Clin. Nutr.*, 2000, vol. 72, pp. 315-323.
2. Boldyrev A.A. Molekulyarnye mekhanizmy toksichnosti gomotsisteina [Molecular mechanisms of toxicity of homocysteine]. *Biokhimiya*, 2009, vol. 74, no 6, pp. 725-736.
3. Kurayan K.M., Berезovskii D.P., Mikashinovich Z.I. Osobennosti okislitel'nogo stressa i morfometricheskie pokazateli sosudov mikrotsirkulyatornogo rusla pri eksperimental'noi umerennoi gomotsisteinemii [Features of oxidative stress and morphometric parameters microvascular in

УДК 547.963.3:633.11

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-36-40

## ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНОСТИ СИНТЕЗА НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТ ПРИ ГЕТЕРОЗИСЕ И СТИМУЛЯЦИИ РОСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ДЕЙСТВИЕМ ГИДРАЗИДА МАЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ

© 2016 г. А.Д. Мамедова, Р.Т. Алиев

Мамедова Афет Дадаш – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт генетических ресурсов Национальной академии наук Азербайджана, пр. Азадлыг, 155, г. Баку, AZ 1106, Азербайджан, e-mail: afet.m@mail.ru

Mamedova Afet Dadash – Candidate of Biological Science, Associate Professor, Leading Researcher, Genetic Resources Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Azadlig Ave, 155, Baku, AZ 1106, Azerbaijan, e-mail: afet.m@mail.ru

Алиев Рамиз Таги – доктор биологических наук, профессор, заведующий отдела физиологии, Институт генетических ресурсов Национальной академии наук Азербайджана, пр. Азадлыг, 155, г. Баку, AZ 1106, Азербайджан, e-mail: aramiz@box.az

Aliev Ramiz Tagi – Doctor of Biological Science, Professor, Head of the Physiology Division, Genetic Resources Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Azadlig Ave, 155, Baku, AZ 1106, Azerbaijan, e-mail: aramiz@box.az

Изучаются активность синтеза нуклеиновых кислот при гетерозисе и стимуляция ростовых процессов, вызываемых действием гидразида малеиновой кислоты. Установлено, что при гетерозисе содержание ДНК в расчете на клетку у гибридов выше, чем у родителей. Гетерозис и стимуляция роста относятся к категории явлений, связанных с механизмами генетической регуляции развития признака. Оба явления характеризуются увеличением транскрипционной активности ДНК, отношения лабильной фракции к стабильной, доли лабильного активного хроматина, что приводит к интенсификации синтетических процессов, способствуя усилению морфогенеза.

**Ключевые слова:** нуклеиновые кислоты, хроматин, гетерозис, стимуляция роста, пшеница.

Current work is devoted to study of activity of nucleic acids synthesis in heterosis and stimulate growth processes induced by action of maleic hydrazide. It was revealed that the content of DNA in per cells of leaf tissue of the heterosis hybrids plants was higher than those of their parents. Heterosis and growth stimulation belong to the category of phenomena relating to the genetic regulation mechanisms of traits. Both phenomena are characterized by increased transcriptional activity of the DNA, ratio of the labile and stable fractions of DNA, and euchromatin portion of DNA, which leads to the intensification of the synthetic processes enhancing morphogenesis.

**Keywords:** nucleic acids, chromatin, heterosis, growth stimulation, wheat.

Известно, что использование гетерозиса, физиологически активных веществ способствует повышению урожайности растений [1, 2].

Гидразид малеиновой кислоты (ГМК) в малых дозах используют как стимулятор роста (рост-стимулятор) и развития растений [3]. При воздействии ГМК в стимулирующих дозах обычно происходят лишь небольшие нарушения обмена веществ, но это значительно активизирует метаболизм, существенно интенсифицирует жизнедеятельность растений.

Анализируя литературные данные, можно констатировать факт активации физиологических процессов при гетерозисе и рост-стимуляции: усиление синтеза хлорофилла, нарастание вегетативной массы [4–6] и др. Высказывается мнение [7], что гибридная мощь во многом напоминает эффект стимуляции, возникающий под влиянием биологически активных веществ или других факторов воздействия, и в мощном развитии вегетативной массы растений ведущую роль играют гены

количественных признаков – QTL, многие из которых идентифицированы молекулярно-генетическими методами [8, 9].

Для выяснения причины развития вегетативной массы нами изучались количественные изменения содержания нуклеиновых кислот в расчете на клетку, а также генетическая активность хроматина при гетерозисе и стимуляции ростовых процессов. Изучение генетических механизмов позволит приблизиться к пониманию природы этих явлений и тем самым эффективно контролировать пути повышения урожайности растений и сохранения их продуктивности, что является актуальной фундаментальной и одновременно прикладной проблемой.

### Материал и методы

В исследовании использовали гетерозисные гибриды пшеницы (*Triticum L.*), полученные в Институте генетики и селекции АН Азербайджана

(к.б.н. Д. Мамедов), и их родительские формы. Опыты по изучению гетерозиса были проведены на растениях в фазе колошения, по изучению роста стимуляции – на проростках пшеницы.

Для определения содержания нуклеиновых кислот и фракционного состава ДНК использовали метод ступенчатого воздействия на хроматин растворами разной ионной силы и факторами депротенизации [10]. Содержание нуклеиновых кислот выражалось на одну клетку, количество которых определялось по методу Брауна в модификации М.А. Али-заде [11]. Результаты анализов обрабатывали статистически [12].

### Результаты исследований

Первая серия опытов была проведена с целью выяснения характера изменения синтеза нуклеиновых кислот при гетерозисе. У изученных комбинаций скрещивания данные относительного содержания нуклеиновых кислот были пересчитаны на клетку. Результаты исследований свидетельствуют об увеличении массы одной клетки у гибридов первого поколения пшеницы, что косвенно свидетельствует о наличии гетерозисного эффекта (табл. 1).

Таблица 1

Содержание нуклеиновых кислот в листьях у различных сортов пшеницы и их гибридов первого поколения (начало колошения)

Гибрид, родительская форма	Сухая масса одной клетки, г·10 <sup>-9</sup>	ДНК	РНК	ДНК на клетку, г·10 <sup>-12</sup>	t <sub>d</sub>	РНК на клетку, г·10 <sup>-12</sup>	РНК/ДНК
		мг% на сухую массу					
Джафари x Oviachic 65	7,80	160,0±1,87	530±5,34	12,49±0,16	19,2	41,3±0,42	3,31
Джафари	4,46	181,9±1,29	547±3,46	8,11±0,07		24,4±0,13	3,00
Oviachic 65	5,52	186,0±1,53	587±1,38	10,08±0,08		31,8±0,11	2,91
Севиндж x v.affine	5,90	172,0±2,20	589±0,12	10,18±0,12	16,9	34,7±0,69	3,41
Севиндж	4,38	174,5±1,58	532±7,27	7,64±0,06		23,3±0,27	3,05
V.affine	4,91	156,1±2,29	537±2,53	7,66±,11		26,4±0,25	3,34
Oviachic 65 x T.turgidum nigrobarbatum	6,98	176,2±1,33	573±6,58	12,30±0,03	18,2	40,0±0,14	3,26
Oviachic 65	5,52	186,0±1,53	587±1,36	10,08±0,08		31,8±0,11	2,91
T.turgidum nigrobarbatum	5,52	144,7±0,54	498±1,68	7,99±0,02		27,5±0,10	3,44
С.Севиндж, v.hordeiforme x v.leucurum, k-70306	5,61	163,1±0,73	530±7,88	9,66±0,05	34,8	26,6±0,43	2,90
С.Севиндж, v.hordeiforme	4,38	174,5±1,58	582±7,27	7,64±0,06		23,3±0,27	3,05
V.leucurum, k-70306	4,06	163,6±0,60	571±0	6,64±0		23,2±0	5,50
С.Севиндж, v.hordeiforme x v.leucurum, k-70338	5,93	176,1±0,47	538±4,42	10,46±0,02	34,0	29,2±0,17	2,80
С.Севиндж, v.hordeiforme	4,38	174,5±1,58	582±7,27	7,64±0,06		23,3±0,27	3,05
V.leucurum, k-70338	5,03	178,4±1,02	516±1,71	8,98±0,06		26,0±0,89	2,89

Пересчет полученных данных на одну усредненную клетку позволил установить ясную картину увеличения абсолютного содержания нуклеиновых кислот у гибридов. Так, в соматической клетке материнского сорта Джафари содержание РНК было 24,4 пг, у отцовского сорта Oviachic – 65÷31,8, а их гибрид содержал 41,3 пг РНК. Но

более интересными и заслуживающими внимания являются данные, характеризующие абсолютное содержание ДНК на клетку. Гибриды первого поколения в соматической клетке содержат больше ДНК, чем родительские формы. При скрещивании двух тетраплоидных сортов (2n=28) Джафари и Oviachic 65 в клетке гибридного растения образу-

ется два генома материнской формы и два – отцовской. Исходя из этого, можно ожидать, что в клетке гибрида будет половина массы ДНК материнского растения (4,05 пг) и половина – отцовского (5,04 пг), а их сумма должна составить 9,09 пг. В действительности у гибрида количество ДНК на клетку составляет 12,49 пг.

Такой же характер увеличения количества ДНК на клетку наблюдался и у других гибридов, что свидетельствует о наличии у гетерозисных гибридов механизмов регуляции, способствующих увеличению количества ДНК в клетке. По-видимому, такой механизм способствует редупликации молекул ДНК в клетке, приводит к соматической полиплоидизации, образованию копий генов или повторяющихся последовательностей на молекуле ДНК. Вероятно, при гетерозисном эффекте процессы редупликации ДНК этим не ограничиваются, а имеет место процесс амплификации, когда число отдельных генов увеличивается при неизменном количестве остальных.

Таким образом, можно предположить, что гетерозисный эффект у гибридов первого поколения заключается в активации комплекса генов.

Функциональная активность клеточного ядра сопряжена с ее структурным состоянием в хроматине, который представляет собой субстанцию хромосом интерфазного ядра. Если структура генома включает в себе потенциальные возможности растений, то активность генома является показателем интенсивности и характера реализации генотипа в морфогенетических процессах. В оценке функциональной активности генетического аппарата интерфазных ядер по их структурному состоянию могут быть использованы такие показатели, как соотношение лабильной и стабильной ДНК, выделяемых из хроматина дробной экстракцией растворами разной ионной силы.

Как видно из табл. 2, исследуемые нами гибриды пшеницы по содержанию суммарной ДНК в клетке находятся в прямой связи с показателями эффекта гетерозиса (масса одного колоса и масса зерна в колосе).

Таблица 2

**Изменение содержания РНК и фракций ДНК у гибридов пшеницы в связи с эффектом гетерозиса (начало колошения)**

Гибрид, родительская форма	Масса одного колоса, г	Масса зерна в колосе, г	РНК в одной клетке, г·10 <sup>-12</sup>	Фракции ДНК в одной клетке, г·10 <sup>-12</sup>				% от общего содержания ДНК			Соотношение лабил./стабил.
				Лабил.	Стабил.	Остаточная	Всего	Лабил.	Стабил.	Остаточная	
Mexico 50 x Sava	2,4	1,8	107,8	14,6	20,0	1,33	35,9	40,6	55,6	3,8	0,73
Mexico 50	1,7	1,2	70,1	11,3	20,7	1,58	33,6	33,7	61,6	4,7	0,55
Sava	2,0	1,6	80,0	12,4	17,4	1,91	31,7	39,0	55,0	6,0	0,71
Mexico 50 x Прибой	2,3	1,8	143,0	12,8	21,7	2,42	37,0	34,6	58,4	5,8	0,59
Mexico 50	1,7	1,2	70,1	11,3	20,7	1,58	33,6	33,7	61,6	4,7	0,55
Прибой	2,2	1,4	87,4	10,2	24,0	1,71	35,9	28,3	67,0	4,7	0,42
V.ferrugineum x Sava	2,7	1,9	119,0	17,3	20,4	1,80	39,6	43,8	51,6	4,6	0,85
V.ferrugineum, k-48177	2,3	1,6	101,0	15,8	18,8	1,28	35,9	44,0	52,5	3,5	0,84
Sava	2,0	1,6	80,0	12,4	17,4	1,91	31,7	39,0	55,0	6,0	0,71
V.ferrugineum x Прибой	2,2	1,5	127,0	11,8	21,1	1,95	34,9	33,8	60,5	5,6	0,56
V.ferrugineum, k-48177	2,3	1,6	101,0	15,8	18,8	1,28	35,9	44,0	52,5	3,5	0,84
Прибой	2,2	1,4	87,4	10,2	24,0	1,71	35,9	27,3	67,0	4,7	0,42

Так, например, гибрид v.ferrugineum x Sava по содержанию суммарной ДНК в клетке отличается от всех остальных испытываемых сортов и гибридов пшеницы. У него наблюдаются самые высокие показатели массы одного колоса и массы зерна в колосе. По содержанию суммарной ДНК в клетке

он отличается от своих родительских форм. Если у гибрида в клетке содержится 39,6 пг ДНК, масса одного колоса равна 2,7 г, масса зерна в колосе – 1,9 г, то у родительских форм эти показатели равны соответственно 35,9 и 31,7 пг ДНК, показатели эффекта гетерозиса – 2,3 и 1,6 г; 2,0 и 1,6 г.



По содержанию суммарной ДНК аналогичные данные получены и у гибридов Mexico 50 x Sava и Mexico 50 x Прибой. Гибрид *v.ferrugineum* x Прибой по содержанию суммарной ДНК не отличаются от родительских форм. Соответственно, у этого гибрида не наблюдается эффект гетерозиса.

Интересные результаты получены при сравнении содержания отдельных фракций ДНК и показателей степени гетерозиса: первые два гибрида по содержанию лабильной ДНК превосходят родительские формы; по содержанию стабильной ДНК почти не отличаются от них. Эффект гетерозиса у этих гибридов высок. Гибрид *v.ferrugineum* x Sava по содержанию как лабильной, так и стабильной ДНК превосходит свои родительские формы; именно этот гибрид и отличается высоким гетерозисным эффектом среди остальных испытываемых гибридов. У гибрида, полученного от комбинации скрещивания *v.ferrugineum* x Прибой, содержание лабильной и стабильной ДНК ниже показателей

обоих родителей. Соответственно, у него содержание суммарной ДНК в одной клетке также ниже по сравнению с родителями; эффекта гетерозиса по продуктивности не наблюдалось.

Факт увеличения лабильной фракции ДНК свидетельствует о высокой активности геномов у гетерозисных гибридов по сравнению с родительскими парами.

Следующая серия исследований была проведена с целью изучения изменений синтеза нуклеиновых кислот в пересчете на клетку при стимуляции ростовых процессов, вызываемых действием стимулирующей рост концентрации ГМК. Результаты опытов представлены в табл. 3.

Анализ данных, полученных при пересчете на клетку, показал активацию синтеза РНК при стимуляции ростовых процессов. Хотя при этом отмечается ослабление синтеза ДНК, однако обращает на себя внимание факт усиления у опытных растений транскрипционной активности ДНК.

Таблица 3

#### Изменение содержания РНК и ДНК в клетке проростков пшеницы при стимуляции и ингибировании ростовых процессов, вызываемых действием ГМК

Вариант	РНК, пг	Фракции ДНК, пг				% лабил. от общей ДНК	Лабил. Стабил.	РНК ДНК
		Лабил.	Стабил.	Остаточная	Сумма			
Контроль	31,340	2,058	6,658	1,384	10,100	20,5	0,31	3,10
Стимуляция роста	48,198	2,160	5,942	1,632	9,734	22,2	0,36	4,95
Контроль	22,048	2,544	3,614	1,506	7,664	33,2	0,70	2,88
Стимуляция роста	22,616	2,104	1,495	0,465	4,064	51,8	1,40	5,57

Изучение фракционного состава ДНК показало, что при стимуляции ростовых процессов у растений не отмечено определенной закономерности по содержанию лабильной фракции ДНК: через 24 ч воздействия ГМК отмечается незначительная активация лабильной ДНК, через 48 ч – его содержание уменьшается. Что касается стабильной ДНК, то отмечено ослабление синтеза этой фракции у опытных растений.

Следует отметить, что при стимуляции ростовых процессов наблюдается увеличение процентного содержания лабильной от общей ДНК. Так, после 24 ч стимуляции ростовых процессов увеличение этого показателя у опытных растений составило 22,2 %, после 48 ч – 51,8 % в сравнении с контрольными растениями. При этом отмечается увеличение отношения лабильной ДНК к стабильной, что может указывать на высокую скорость биосинтетических процессов у опытных вариантов.

Стимуляция ростовых процессов в наших исследованиях сопровождалась увеличением РНК, РНК/ДНК и доли ДНК эухроматина в ядре, отношения лабильной фракции ДНК к стабильной.

Таким образом, гетерозис и рост-стимуляция относятся к категории явлений, связанных с механизмами генетической регуляции развития признака. Эти явления характеризуются увеличением транскрипционной активности ДНК, отношения лабильной фракции к стабильной, доли лабильного активного хроматина, что приводит к интенсификации синтетических процессов, способствуя усилению морфогенеза.

#### Литература

1. Birchler J.A., Yao H., Chudalayandi S., Vaiman D., Veitia R.A. Heterosis // *The Plant Cell*. 2010. Vol. 22, № 7. P. 2105–2112.
2. Госунов Я.К., Миргородский И.Ю., Чернышева Н.В. Применение препарата Гумата К на томатах // *Научные достижения молодежи Кубани: материалы науч. конф.* Краснодар, 2001. С. 25.
3. Ракитин Ю.В. Гидразид малеиновой кислоты как регулятор роста растений. М., 1973. 368 с.
4. Гончарова Ю.К. Наследование признаков, определяющих физиологический базис гетерозиса у гибридов риса // *Сельскохозяйственная биология*. 2010. Т. 45, № 5. С. 72–78.

5. Тосунов Я.К. Повышение продуктивности и качества томата под действием регуляторов роста: дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2008. 150 с.
6. Karlberg A. Molecular Analysis of Factors Regulating Wood Formation and Seasonal Growth Cycles in Hybrid Aspen: Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Science. Umeå, 2011. P. 1–70.
7. Конарев В.Г., Ахметов Р.Р., Гилязетдинов Ш.Я. О природе гетерозиса и его проявления по данным биохимии и молекулярной генетики // Физиологические и биохимические аспекты гетерозиса и гомеостаза растений. Уфа, 1976. С. 5–20.
8. Gepts P. A comparison between Crop Domestication, Classical Plant Breeding and Genetic Engineering // Crop Science. 2002. Vol. 42(6). P. 1780–1790. Doi: 10.2135/cropsci2002.1780;20.
9. Asins M.J. Present and future of quantitative trait locus analysis in plant breeding // Plant Breeding. 2002. Vol. 121(4). P. 281–291. Doi: 10.1046/j.1439-0523.2002.730285.x
10. Алексеев В.Г. Гетерогенность ДНК проростков пшеницы и активность генома // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1973. Т. 52, № 1. С. 46–56.
11. Али-заде М.А., Ахундова Э.М., Алиев Р.Т., Гаджиева Ш.И. Метод пересчета показателей относительного содержания веществ на одну клетку листа растения // Изв. АН Азерб. ССР. Серия Б. 1979. № 6. С. 29–33.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами стат. обработки результатов исследований). М., 1985. 351 с.
4. Goncharova Yu.K. Nasledovanie priznakov, opredelyayushchikh fiziologicheskii bazis geterozisa u gibridov risa [Inheritance of attributes that determine the physiological basis of heterosis in rice hybrids]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2010, vol. 45, no 5, pp. 72-78.
5. Tosunov Ya.K. *Povyshenie produktivnosti i kachestva tomata pod deistviem regulyatorov rosta*: dis. ... kand. s.-kh. nauk [Increasing the efficiency and quality of tomato under the influence of growth regulators]. Krasnodar, 2008, 150 p.
6. Karlberg A. *Molecular analysis of factors regulating wood formation and seasonal growth cycles in hybrid aspen*. Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Science. Umeå, 2011, pp. 1-70.
7. Konarev V.G., Akhmetov R.R., Gilyazetdinov Sh.Ya. [On the nature of heterosis and its manifestations according to biochemistry and molecular genetics]. *Fiziologicheskie i biokhimicheskie aspekty geterozisa i gomeostaza rastenii* [Physiological and biochemical aspects of heterosis and homeostasis of plants]. Ufa, 1976, pp. 5-20.
8. Gepts P. A comparison between Crop Domestication, Classical Plant Breeding and Genetic Engineering. *Crop Science*, 2002, vol. 42(6), pp. 1780-1790. Doi: 10.2135/cropsci2002.1780;20.
9. Asins M.J. Present and future of quantitative trait locus analysis in plant breeding. *Plant Breeding*, 2002, vol. 121(4), pp. 281-291. Doi: 10.1046/j.1439-0523.2002.730285.x.
10. Alekseev V.G. Geterogennost' DNK prorostkov pshenitsy i aktivnost' genoma [The heterogeneity of the DNA genome of wheat seedlings and activity]. *Trudy po prikladnoi botanike, genetiki i seleksii*, 1973, vol. 52, no 1, pp. 46-56.
11. Ali-zade M.A., Akhundova E.M., Aliev R.T., Gadzhieva Sh.I. Metod perescheta pokazatelei otноситel'nogo sodержaniya veshchestv na odnu kletku lista rasteniya [The method of conversion rates relative content of substances on one square sheet plants]. *Izvestiya AN Azerb. SSR. Seriya B*, 1979, no 6, pp. 29-33.
12. Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami stat. obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methods of field experience (with the fundamentals of statistical processing of the results of research)]. Moscow, 1985, 351 p.

#### References

1. Birchler J.A., Yao H., Chudalayandi S., Vaiman D., Veitia R.A. Heterosis. *The Plant Cell*, 2010, vol. 22, no 7, pp. 2105-2112.
2. Tosunov Ya.K., Mirgorodskii I.Yu., Chernysheva N.V. [The use of the preparation Humate K on tomatoes]. *Nauchnye dostizheniya molodezhi Kubani* [Scientific achievements of Kuban youth]. Scientific conf. materials. Krasnodar, 2001, p. 25.
3. Rakiitin Yu.V. *Gidrazid maleinoyi kisloty kak regulyator rosta rastenii* [Maleic hydrazide as a plant growth regulator]. Moscow, 1973, 368 p.

УДК 628.1/3:639.3.:639.3/5

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-41-48

## ИННОВАЦИОННАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ПРОДУКЦИИ АКВАБИОКУЛЬТУРЫ В МОДУЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ\*

© 2016 г. **Г.Г. Матишов, Е.Н. Пономарева, А.В. Казарникова, Л.П. Ильина, В.А. Григорьев, Т.А. Соколова, Т.Н. Польшина, М.В. Коваленко, А.А. Кузов, А.А. Корчунов**

*Матишов Геннадий Григорьевич – академик, председатель Южного научного центра РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: matishov\_ssc-ras@ssc-ras.ru*

*Пonomareva Елена Николаевна – доктор биологических наук, профессор, заведующая отделом водных биологических ресурсов бассейнов южных морей, Южный научный центр РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Казарникова Анна Владимировна – доктор биологических наук, и.о. заведующая отделом ихтиологии, Южный научный центр РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: kazarnikova@ssc-ras.ru*

*Ильина Людмила Павловна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Институт аридных зон Южного научного центра РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: iljina@ssc-ras.ru*

*Григорьев Вадим Алексеевич – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Южный научный центр РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Соколова Татьяна Александровна – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Институт аридных зон Южного научного центра РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: Sta1562@yandex.ru*

*Польшина Татьяна Николаевна – младший научный сотрудник, Институт аридных зон Южного научного центра РАН пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: gracheva@ssc-ras.ru*

*Коваленко Матвей Викторович – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Южный научный центр РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Кузов Антон Алексеевич – младший научный сотрудник, Южный научный центр РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Корчунов Александр Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Южный научный центр РАН, пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Matishov Gennadii Grigor'evich – Academician of RAS, Head of Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: matishov\_ssc-ras@ssc-ras.ru*

*Ponomareva Elena Nikolaevna – Doctor of Biological Science, Professor, Head of the Department of Water Biological Resources of Southern Seas Basin, Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Kazarnikova Anna Vladimirovna – Doctor of Biological Science, Head of Ichthyologic Laboratory, Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: kazarnikova@ssc-ras.ru*

*Il'ina Lyudmila Pavlovna – Candidate of Agricultural Science, Leading Scientific Researcher, Institute of Arid Zones of the Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: iljina@ssc-ras.ru*

*Grigor'ev Vadim Alekseevich – Candidate of Biological Science, Researcher, Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Sokolova Tat'yana Aleksandrovna – Candidate of Biological Science, Junior Researcher, Institute of Arid Zones of the Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: Sta1562@yandex.ru*

*Pol'shina Tat'yana Nikolaevna – Junior Researcher, Institute of Arid Zones of the Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: gracheva@ssc-ras.ru*

*Kovalenko Matvei Viktorovich – Candidate of Biological Science, Researcher, Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Kuzov Anton Alekseevich – Junior Researcher, Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: kafavb@mail.ru*

*Korchunov Aleksandr Aleksandrovich – Candidate of Biological Science, Researcher, Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: kafavb@mail.ru*

\*Работа проводится по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 гг.», проект «Создание научно-технического задела и структуры производственного кластера интегрированной этажной биотехнологии получения экологически чистой продукции аквакультуры для формирования высокоэффективного рыбного хозяйства с учетом региональных особенностей юга Российской Федерации» (соглашение № 14.604.21.0098 от 16 июля 2014 г.)

Представлены результаты по разработке инновационной биотехнологии получения экологически чистой продукции аквабиокультуры в установке замкнутого водоснабжения (УЗВ). Исследования выполнены (2014–2016) в специально созданном экспериментальном образце модульной УЗВ аквабиокомплекса Южного научного центра РАН. УЗВ позволяет осуществлять выращивание гидробионтов в контролируемых условиях на разных этапах их развития и получать продукцию разных объектов товарной аквакультуры (гибридные формы осетровых, сомовые, растительные культуры и др.). Установлено, что для получения товарной продукции осетровых рыб (1500,0–2000,0 г) требуется 12 мес., африканского клариевого сома (1200,0 г) – 6. При этом отмечено, что при увеличении плотности посадки рыб в УЗВ до 40 кг/м<sup>3</sup> продуктивность растений возрастает в 1,3–1,8 раза.

**Ключевые слова:** инновационная биотехнология аквабиокультуры, модульная установка замкнутого водоснабжения, гидробионты, аквапоника, экологически чистая продукция.

*The data obtained by aquabiocultural innovative biotechnology for organic products rearing in recirculation system module are presented. Research was carried out at aquabiocomplex of Southern Scientific Center of RAS (2014–2016), in specially constructed module with controlled environmental conditions. It allows to rear hydrobionts of different age stages and to provide commercial rearing of different aquacultural objects (sturgeon hybrids, catfish, plants etc.). It was found that 12 months is a sufficient time to achieve commercial weight (1500,0–2000,0 g) for sturgeon hybrids and 6 months – for catfish (1200,0 g). It was observed in recirculation system that productivity of plants increased by 1,3–1,8 times as fish density was increased to 40 kg/m<sup>3</sup>.*

**Keywords:** innovation biotechnology of aquabioculture, recirculation system, hydrobionts, aquaponics, organic products.

Совместное выращивание гидробионтов и растительных культур в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) – перспективное и динамично развивающееся направление современной аквакультуры. Одним из путей повышения эффективности УЗВ является использование интегрированных методов и технологий, создание на базе рыбоводных установок искусственных агрогидроэкосистем. Преимуществом последних являются компактность и возможность размещения в непосредственной близости от потребителей – крупных городов, где ощущается дефицит и дороговизна земельных и водных ресурсов [1].

Первые попытки создания УЗВ, где для очистки оборотной воды был использован растительный блок гидропонного типа для выращивания различных сельскохозяйственных культур, были предприняты в Европе и США. Позднее это направление в аквакультуре стало привлекать все большее внимание ученых. Подобные экспериментальные установки были разработаны в Австралии, Англии, Германии, Китае, Нидерландах, Португалии, Японии и других странах [2]. Исследования по совместному выращиванию рыбы и растений проводятся в России с 1984 г. в Московской сельскохозяйственной академии [3] и Уральском государственном университете [4]. Установлено, что на каждый килограмм выращенной рыбы можно получить до 18–19 кг овощей, при этом содержание нитратов в растениях не превышает 30 мг/кг сырой массы, тогда как на минеральном питании в условиях традиционной гидропоники эта величина достигает 130–400 мг/кг [5].

В Южном научном центре РАН с 2002 г. занимаются изучением гидробионтов, выращиваемых в УЗВ [6, 7]; с 2014 г. начаты исследования по созданию интегрированной инновационной этажной биотехнологии для получения экологически чистой

продукции различных объектов аквакультуры (гибридные формы осетровых, сомовые, растительные культуры и др.) с использованием оборотной и сбросной воды в УЗВ.

Цель настоящей работы – разработать комплекс научно-методических основ и технических решений, позволяющих создать интегрированную инновационную биотехнологию получения экологически чистой продукции аквабиокультуры в модульной УЗВ.

## Материалы и методы

Исследования проводились в 2014–2016 гг. на научно-экспедиционной базе ЮНЦ РАН «Кагальник» (Азовский район). Совместное выращивание рыб и растительных культур осуществлялось в бассейнах УЗВ аквакомплекса с контролируемыми условиями среды (кислород – 60–90 %; температура – 23–25 °С, рН – 6,9–8,2) и водообменом в течение 1 ч.

### Экспериментальная интегрированная этажная установка

Интегрированная этажная установка (ИЭУ) создана специально для проведения эксперимента. Она представляет собой систему бассейнов, лотков, отстойников, фильтров (механических и биологических), а также системы освещения и экспресс-онлайн-контроля гидрохимических параметров (рисунок). Особенностью ИЭУ является использование биотехнологии безотходного производства, что обеспечивает высокую экологическую безопасность. При этом отходы (продукты обмена) одного биологического кластера используются другим на последующих этапах до их полной утилизации внутри замкнутой системы.

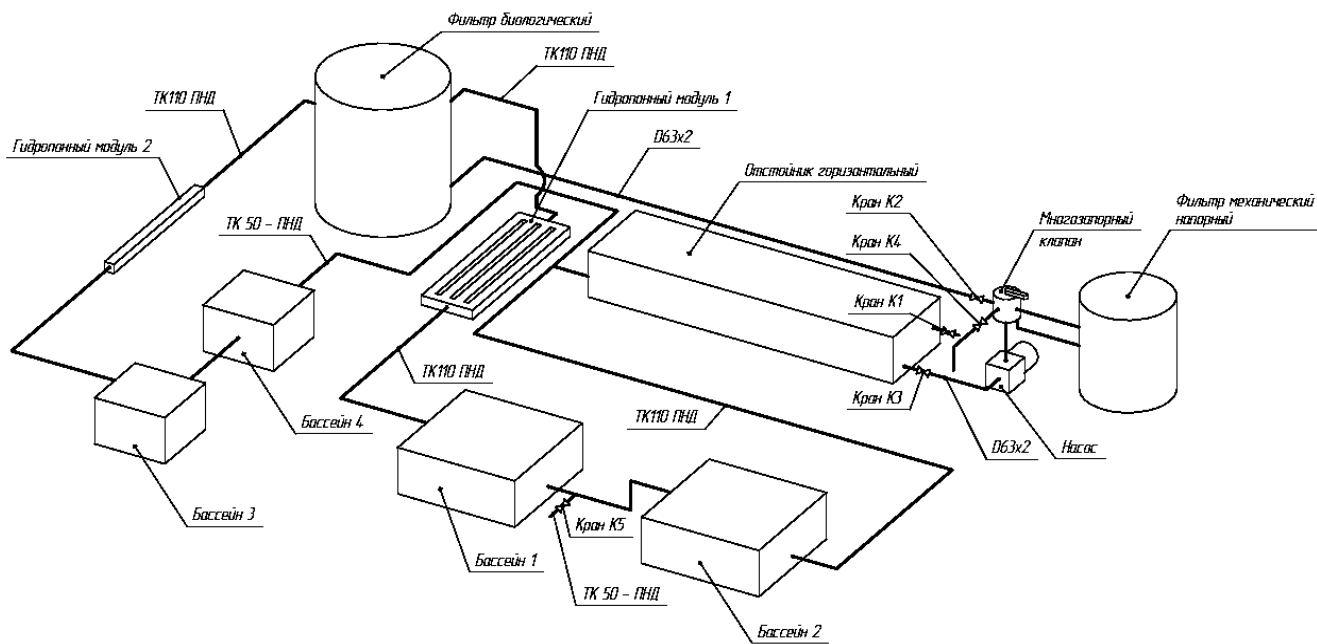


Схема ИЭУ

Гидрохимические анализы в бассейнах выполняли согласно методам, общепринятым в рыбоводстве [8], измерение морфометрических показателей растений (высота, размер листовых пластинок, фенофаза развития, сырая фитомасса, вес плодов и др.) – в ботанических исследованиях [9].

В работе использованы стандартные методы исследований: pH водной среды определяли потенциометрическим методом [10], показатель освещенности растений в люксах – люсометром РН 300, показатели температуры и влажности воздуха – стандартным ареометром, содержание нитратов в листьях и плодах растений – экспресс-методом с использованием нитратомера, а также фотометрическим методом [11].

Взвешивание и измерение рыб проводилось согласно рекомендациям И.Ф. Правдина [12]. Коэффициент упитанности рассчитывался по Т. Фультону [12]. Общий прирост и выживаемость рыб, расчет среднесуточной скорости роста и коэффициент массонакопления определялись методами, общепринятыми в ихтиологии [13]. Кровь отбирали из хвостовой вены с использованием шприца. Анализ физиолого-биохимических показателей крови рыб (скорости оседания эритроцитов, содержания в крови рыб сывороточного белка, гемоглобина, общих липидов и холестерина) проводили согласно общепринятым методам [14]. Результаты обрабатывали с применением общепринятых методов биологической статистики и с помощью компьютерной программы Excel.

При выборе растений учитывали следующие критерии: гибрид (для возможного самоопыления), районированные, скороспелые, низкорослые, ком-

пактные сорта для закрытого грунта. В начале эксперимента было 8 культур (15 сортов), затем в работе остались 4 вида (5 сортов) овощных культур, наиболее перспективных для выращивания методом аквапоники: салат листовой (*Lactuca sativa* L.) – сорт Король рынка; петрушка (*Petroselinum crispum* (Mill.) A. W. Hill) – сорт Мооскраузе 2; перец (*Capsicum annuum* L.) – сорт Оранжевое чудо и Париж; огурец (*Cucumis sativus* L.) – сорт Зятек. В качестве субстрата использовали вермикулит, керамзит, минеральную вату и кокосовое волокно. Установлено, что лучше всего использовать керамзит (средней фракции, до 1 см в диаметре), так как в нем корневая система растений хорошо удерживается и развивается. Предварительно все семена растений проращивались в пробках из минеральной ваты до получения рассады, а затем пересаживались в горшочки с керамзитом и помещались в аквапонную установку на гидропонных плавающих матах, при этом для площади 1 м<sup>2</sup> плотность посадки не должна превышать 80 горшочков. В эксперименте подобран оптимальный тип освещения для различных растений с использованием светодиодных конструкций с лампами мощностью 200÷900 лк.

Высокие адаптивные способности и ценные потребительские свойства гибрида стерлядь×белуга (стербел) позволили принять его в данном исследовании как базовый вид, на оптимальные условия выращивания которого ориентирована технология содержания других гидробионтов. По биологическим особенностям и параметрам среды, наиболее подходящим к основному объекту, были выбраны клариевый сом, ампулярия и австралийский рак. Выращивание гибридов осетровых рыб осуществ-

лялось в бассейнах объемом 6÷8 м<sup>3</sup>, африканского клариевого сома – 4 м<sup>3</sup>, брюхоногого моллюска ампулярии и австралийского красноклешневого рака – 1 м<sup>3</sup>. Для кормления рыб использовали корм *Biomar* согласно существующим нормативам.

### Результаты исследований

*Гидрохимические условия при проведении эксперимента.* Температура воды в период выращивания

рыб в бассейнах колебалась в пределах 23÷25 °С, рН водной среды – 6,9÷8,2 (табл. 1). Нитриты и нитраты находились в пределах нормы, что служило показателем хорошей работы биологического фильтра, когда первая и вторая стадии нитрификации проходят нормально. Количество нитритов, наиболее опасных для рыб, находилось в пределах допустимой нормы – 0,1–0,2 мг N/л. Количество нитратов не превышало 34 мг N/л и соответствовало нормативам (табл. 1).

Таблица 1

Гидрохимические показатели в ИЭУ в период проведения эксперимента

Показатели	Бассейн с гибридами осетровых	Бассейн с африканскими сомами	Норма
Температура воды, °С	23, 24	24, 25	25
рН	6,9÷7,5	7,5÷8,2	6,8÷8,5
Насыщение кислородом, %	72÷75	65÷70	70÷85
Влажность, %	40÷70	40÷70	60÷75
Фосфаты, мг P/л	0,03÷0,09	0,2÷0,3	0,5
Нитриты, мг N/л	0,02÷0,03	0,17÷0,19	0,1÷0,2
Нитраты, мг N/л	22÷24	28÷34	до 60
Аммиак, мг N/л	0,016÷0,022	0,018÷0,025	до 0,05

*Выращивание растений методом аквапоники в ИЭУ.* Полученные результаты по изучению показателей роста, развития и продуктивности растений в аквакомплексе представлены в табл. 2.

*Салат листовой (сорт Король рынка)* – пластичная культура, отличающаяся высокой продуктивностью. Длительность периода вегетации в эксперименте составляла от 33 до 70 дней, продуктивность – 2,47÷6,0 кг/м<sup>2</sup>, при этом за 5 мес. можно получить до 6 урожаев (табл. 2). Выявлено, что салат очень требователен к свету. Оптимальное освещение для этой культуры – 9000 лк. Выращивать салат на гидропонном плавающем мате площадью 0,17 и 0,6 м<sup>2</sup> выгоднее, чем на 1÷1,5 м<sup>2</sup>, что подтверждается более высокими показателями продуктивности.

В условиях модульной УЗВ возможность накопления нитратов в листьях салата возрастает в связи с наличием живых объектов, продукты жизнедеятельности которых поступают с водой в систему аквакультуры растений. Однако проведенные анализы показали, что содержание нитратного азота в листьях салата – 1157 мг/кг сырой массы и не превышает нормы ПДК – 2000 мг/кг.

*Петрушка (сорт Мооскраузе 2).* Растения хорошо произрастают в условиях аквакомплекса. Период от появления всходов до получения технически зрелой продукции петрушки составляет от 56 до 70 дней, требовательна к свету; оптимальное освещение светодиодными лампами – 7500÷9000 лк. При

посеве в минеральную пробку необходимо сеять от 3 до 6 семян, чтобы достигнуть оптимальной плотности листьев растения. Выращивать петрушку на гидропонном плавающем мате площадью 0,17 и 0,6 м<sup>2</sup> выгоднее, чем на 1÷1,5 м<sup>2</sup>, что подтверждается более высокими показателями продуктивности. Продуктивность петрушки – до 2,294 кг/м<sup>2</sup> (табл. 2). Количество нитратов в листьях – 1856 мг/кг, что не превышает ПДК (2000 мг/кг).

*Перец – сорта: Оранжевое чудо – горький, Париж – сладкий.* Происхождение перца из тропических стран определяет его высокую требовательность к условиям выращивания: свету, теплу и влаге. Выращивание рассады перца из семян проводили с помощью минеральных пробок, в каждую помещали по одному семени. В аквакомплексе при t=+21 °С и влажности субстрата 70÷75 % первые всходы перца появились на 14-й день от посадки семян. При посадке перца на гидропонные плавающие маты необходимо учитывать, что расстояние между посадочными горшочками должно быть от 6 до 15 см, что обеспечивает оптимальную площадь для развития растений. После окончательной пересадки стебель растения начинает раздваиваться, по мере роста растения нужно подвязывать, а также удалять придаточные побеги и лишние листья, чтобы все питательные вещества уходило в самые сильные стебли, где образуются завязи плодов. Первые плоды у сортов Оранжевое чудо и Париж отмечены через 118 дней от посадки семян. Анализ пока-

зал, что средняя масса всех плодов для сорта Оранжевое чудо – 2,241 кг/м<sup>2</sup>, сорта Париж – 4,201 м<sup>2</sup> (табл. 2). Содержание нитратов в плодах соответствует норме и не превышает ПДК – 200 мг/кг.

*Огурец, сорт Зятек.* Культура требовательна к условиям выращивания: свету, теплу и влаге. Выращивание огурцов в эксперименте проходило в 2 этапа: посев семян в минеральную пробку и пикировка в горшочки с керамзитом; высадка рассады (в фазе 4–5 листьев) в проточную аквапонную систему и размещение на шпалере. Оптимальной для нормального развития корневой системы огурцов считается температура  $t=+20\div 27$  °С, но в аквакомплексе температура воды была 19÷21 °С, воздуха – 18÷22 °С, поэтому длительность вегетации огурцов до появления первых плодов составила 97 дней. При этом отмечено, что через 15÷20 дней после помещения растений в проточную аквапонную систему корневая система истончилась, листья на рас-

тениях стали желтеть, а завязь – сохнуть и опадать. Перепад температур в 3÷4 °С способствует удлинению междоузлий растений, поэтому необходимо проводить срез точки роста после 8 междоузлий. В среднем за период проведения эксперимента масса одного плода огурца была от 50 до 599 г, средний показатель массы – 249 г. Длина плода максимальная – 31,6 см, минимальная – 9,7. Урожайность огурцов – 6,916÷12,42 кг/м<sup>2</sup> (табл. 2). Проведенные анализы на содержание нитратов в плодах огурцов отклонения от нормы не выявили (ПДК не выше 150 мг/кг).

Эксперимент по выращиванию растений методом аквапоники проводился при разной плотности рыб: на 1-м этапе этот показатель был 26 кг/м<sup>3</sup> (период апрель – август), на 2-м – 40÷50 (сентябрь – декабрь). Выявлено, что при увеличении плотности рыб продуктивность растений возрастает в 1,3÷1,8 раза (табл. 2).

Таблица 2

## Показатели роста, развития и продуктивности культур, выращиваемых методом аквапоники

№	Параметр	Культура									
		Салат Король рынка		Петрушка Мооскраузе 2		Перец Оранжевое чудо		Перец Париж		Огурец Зятек	
		Этапы									
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Плотность рассады, см	3	3–9	3	3	11	11	11	11	8	8
2	Масса зрелого растения, г	Зеленые листья				Плоды					
	Min	16	33,3	12,5	13,5	6,2	–	23	–	50	–
	Media	32,3	34,4	16,1	19,3	9,5	–	35,7	–	249,6	–
	Max	46,5	65,7	19,5	22,4	16,2	–	56,3	–	599	–
3	Высота растения, см										
	Min	11,5	12,7	12	13,7	1,8		2,1		9,7	
	Media	23,7	25,4	18,3	19,8	4,9		5,9		19,5	
	Max	57,4	45,3	27	26	6,7		8,9		31,6	
4	Длительность периода вегетации, число урожаев	6	3	2	2	1 урожай, продолжает плодоносить		1 урожай, продолжает плодоносить		Начало созревания	
	min	43	33	94	49	–	–	–	–	–	–
	Media	57	48	104	52	–	–	–	–	–	–
	Max	70	56	114	54	118	–	118	–	97	–
5	Всхожесть, %	97–100	100	97,3	95,5	86,7		73,3		86,7	
6	Продуктивность, кг/м <sup>2</sup>					Продолжает плодоносить		Продолжает плодоносить			
	Min	2,472	2,705	1,472	1,588						
	Media	4,424	3,852	1,882	1,911	–	–	–	–	–	–
	Max	6	7,452	2,294	3,335	2,241	3,13	4,201	5,05	6,916	12,42
7	Продуктивность, кг/м <sup>2</sup> в год (Media)	37,6	56,4	16,0	20,8	8,0	11,2	9,0	12,2	38,0	49,4

**Примечание.** Плотность посадки рыб на 1-м этапе эксперимента составляла 26 кг/м<sup>3</sup>, на 2-м – 40÷50: 1-й этап эксперимента – апрель – август; 2-й – сентябрь – декабрь 2015 г.

*Рыбоводно-биологическая и физиологическая оценка стербела при выращивании в УЗВ и ИЭУ.* Сравнительный анализ экспериментальных данных по выращиванию стербела одинаковых весовых и возрастных характеристик в УЗВ (контроль) и ИЭУ (опыт) выявил сходную направленность динамики массовых характеристик. В бассейне ИЭУ абсо-

лютный прирост стербела по массе в конце исследуемого периода был выше (на 23 %), чем при выращивании в УЗВ. Сравнение удельных величин, характеризующих среднесуточный прирост (23 %), среднесуточную скорость роста (12 %) и коэффициент массонакопления (14 %), показало похожую динамику (табл. 3).

Таблица 3

#### Динамика массовых характеристик у стербела при выращивании в УЗВ и ИЭУ

Показатель	Контроль		Опыт	
	Исходное состояние	245 сут	Исходное состояние	245 сут
Масса, г	100,3±8,15	780±40	95,1±9,14	980±180*
Абсолютный прирост, г		679,70		884,90
Среднесуточный прирост, г/сут		2,77		3,61
Среднесуточная скорость роста, %		0,84		0,96
Коэффициент массонакопления, ед.		0,06		0,07
n	10	10	10	10

\* – различие недостоверно,  $p > 0,05$ .

Результаты исследования физиолого-биохимических показателей крови рыб выявили высокие значения уровня гемоглобина ( $40,0 \pm 1,00$ ;  $56,0 \pm 0,60$  г/л), холестерина ( $1,40 \pm 0,08$ ;  $2,4 \pm 0,10$  ммоль/л), белка ( $19,0 \pm 1,00$ ;  $30,0 \pm 2,40$  г/л) и бета-липопротеидов ( $2,1 \pm 0,10$ ;  $3,96 \pm 0,25$  г/л) у рыб, выращиваемых как в УЗВ, так и ИЭУ. Показано, что физиологические показатели стербела в контроле и опыте достоверно не отличались ( $p > 0,05$ ).

*Рыбоводно-биологическая и физиологическая оценка клариевого сома при выращивании в УЗВ и ИЭУ.* Анализ экспериментальных данных выявил увеличение абсолютного прироста массы клариево-

го сома в ИЭУ по сравнению с УЗВ на 1 %. Сравнение удельных величин, характеризующих среднесуточный прирост (1 %) и среднесуточную скорость роста (7 %), показало сходную динамику. Коэффициент массонакопления в ИЭУ и УЗВ имел одинаковые значения (табл. 4). Сравнение физиолого-биологических показателей крови рыб, выращиваемых в УЗВ и ИЭУ, достоверных различий не выявило ( $p > 0,05$ ). Отмечены высокие значения уровня гемоглобина ( $64,15 \pm 4,46$ ;  $64,92 \pm 4,271$  г/л), холестерина ( $2,39 \pm 0,04$ ;  $2,50 \pm 0,18$  ммоль/л), белка ( $23,13 \pm 2,45$ ;  $28,30 \pm 0,86$  г/л) и бета-липопротеидов ( $3,86 \pm 0,34$ ;  $4,12 \pm 0,45$  г/л).

Таблица 4

#### Динамика массовых характеристик клариевого сома при выращивании в УЗВ (контроль) и ИЭУ (опыт)

Показатель	Контроль		Опыт	
	Исходное состояние	435 сут	Исходное состояние	435 сут
Масса, г	245,35±12,07	2530±560	300,33±18,56	2610±240
Абсолютный прирост, г		2284,65		2309,67
Среднесуточный прирост, г/сут		5,25		5,31
Среднесуточная скорость роста, %		0,50		0,54
Коэффициент массонакопления, ед.		0,05		0,05
n	8	8	10	10

*Характеристика выращивания добавочных объёмов в ИЭУ.*

*Австралийский красноклешиновый рак.* Период выращивания рака в модульной установке соста-

вил 270 сут. При этом его масса изменялась от  $1 \div 2$  до 70 г, а общий прирост составил 68,8 г. Выживаемость при экспериментальном выращивании достигала 70 %. Плотность посадки рака при со-



вместном выращивании с растениями не превышала  $3,5 \text{ кг/м}^3$ .

*Брюхоногий моллюск ампулярия.* Полученные данные свидетельствуют, что для получения навески моллюска  $20 \div 25 \text{ г}$  требовалось  $60 \div 70 \text{ сут}$ . При этом общий прирост составил  $19 \div 24 \text{ г}$ , выживаемость –  $75 \%$ . Плотность посадки ампулярии при совместном выращивании с растениями не превышала  $5 \text{ кг/м}^3$ .

### Заключение

В результате проведенных исследований разработаны научно-методическая основа и техническое решение для интегрированной инновационной биотехнологии получения экологически чистой продукции разных объектов аквабиоккультуры в УЗВ. Используются новые технические решения по обеспечению работы УЗВ и контролю параметров среды: последовательная схема подачи воды, биологический фильтр по технологии кипящего слоя, система мониторинга аммонийного азота в режиме онлайн. Создан и прошел успешную апробацию экспериментальный образец аквабиоккомплекса, который позволяет осуществлять выращивание гидробионтов в контролируемых условиях на разных этапах их развития и получать экологически чистую продукцию из разных объектов аквакультуры (гибридные формы осетровых, сомовые, растительные культуры и др.).

Для получения растительной продукции методом аквапоники сроки выращивания растений составляют для салата –  $1 \text{ мес.}$ , для всех остальных культур (петрушка, перец, огурец) –  $2 \text{ мес.}$ . Продуктивность растений за  $1 \text{ год}$ : салата –  $37,6 \div 56,4 \text{ кг/м}^2$ ; петрушки –  $16 \div 20,8 \text{ кг/м}^2$ ; перца в среднем – с одного растения от  $1,5 \text{ до } 2 \text{ кг}$ , огурца – до  $40 \text{ кг}$  с  $1 \text{ м}^2$ . Выявлено, что при увеличении плотности рыб в УЗВ до  $40 \div 50 \text{ кг/м}^3$  продуктивность растений возрастает в  $1,3 \div 1,8$  раза.

Отдельные физиологические и массовые показатели рыб, полученные в ходе эксперимента, соответствовали данным, опубликованным в литературе [7, 15]. Согласно многолетним исследованиям [15], основные функциональные показатели крови, которые можно считать нормой для оценки состояния осетровых рыб в естественных условиях: СОЭ – от  $2 \text{ до } 4 \text{ мм/ч}$ ; концентрация гемоглобина – от  $50 \text{ до } 80 \text{ г/л}$ ; белок – от  $28 \text{ до } 40 \text{ г/л}$ ; холестерин – от  $1,0 \text{ до } 2,8 \text{ ммоль/л}$ , бета-липопротеиды – от  $2 \text{ до } 4 \text{ г/л}$ .

При стабильных гидрохимических условиях выращивания и применении искусственных кормов концентрация гемоглобина, холестерина и бета-

липопротеидов в крови осетровых может быть несколько повышена [7].

Сравнение значений физиологических показателей гибридов осетровых, полученных в ходе эксперимента, и рыб из природной среды показало их соответствие модальному диапазону для рыб из естественной среды и приближению к верхней границе нормы.

Использование УЗВ этажного типа позволяет более эффективно решать технологические проблемы замкнутого цикла, используя культивируемые объекты для создания комфортной среды и одновременно получая дополнительную (австралийский красноклешневый рак, ампулярия) животную и растительную продукцию. Необходимым условием выращивания рыб в УЗВ этажного типа является тщательный подбор особей по массе и возрасту.

Внедрение разработанной инновационной биотехнологии в аквакультуру позволит эффективно развивать фермерское рыбоводство на Юге России, получать экологически чистую продукцию, более эффективно решать проблему стабилизации параметров среды на приемлемом уровне за счёт использования самих объектов выращивания, получая одновременно дополнительную животную и растительную продукцию.

### Литература

1. Жигин А.В. Замкнутые системы в аквакультуре. М., 2011. 665 с.
2. Lennard W.A., Leonard B.V. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system // Aquacult. Int. 2006. Vol. 14, № 6. P. 539–550.
3. Лавровский В.В. Пути интенсификации форелеводства. М., 1981. 168 с.
4. Умелев В.Л., Мухаметшина Е.Н. Ритмы кислорода и pH в УЗВ // Индустриальное рыбоводство в замкнутых системах: сб. науч. тр. М., 1991. Вып. 64. С. 9–10.
5. Лавровский В.В., Завьялов А.П. Методические разработки по курсу рыбоводства. Замкнутые рыбоводные системы. 1998. 96 с.
6. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Пономарева Е.Н., Сорочкина М.Н., Казарникова А.В., Коваленко М.В. Основы осетроводства в условиях замкнутого водообеспечения для фермерских хозяйств. Ростов н/Д., 2008. 112 с.
7. Пономарева Е.Н., Металлов Г.Ф., Григорьев В.А., Ковалёва А.В., Пономарёв С.В., Левина О.А. Динамика функционального состояния молоди гибрида руссколенского осетра при моделировании условий выращивания в установке замкнутого водоснабжения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2012. № 5. С. 72–77.
8. Боева Л.В. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1. Ростов н/Д., 2009. 1046 с.
9. Генкель П. А. Физиология растений. М., 1975. 336 с.

10. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М., 1970. 487 с.
11. Александрова Л.Н., Найденова О.А. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. Л., 1986. 295 с.
12. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М., 1966. 376 с.
13. Купинский С.В., Баранов С.А., Резников В.Ф. Радужная форель – предварительные параметры стандартной модели массонакопления // Индустриальное рыбководство в замкнутых системах: сб. науч. тр. М., 1985. Вып. 46. С. 109–115.
14. Меньшиков В.В. Клиническая лабораторная аналитика. М., 2002. Т. 1. 860 с.
15. Металлов Г.Ф., Гераскин П.П., Аксёнов В.П., Левина О.А. Многолетний мониторинг физиологического состояния основных видов каспийских осетровых рыб // Вестн. АГТУ. Рыбное хозяйство. 2016. № 1. С. 88–98.
7. Ponomareva E.N., Metallov G.F., Grigor'ev V.A., Kovaleva A.V., Ponomarev S.V., Levina O.A. Dinamika funktsional'nogo sostoyaniya molodi gibrida russko-lenskogo osetra pri modelirovaniy uslovii vyrashchivaniya v ustanovke zamknutogo vodosnabzheniya [The dynamics of the functional state of juvenile hybrid Russian-Lena sturgeon in the simulation growing conditions in the installation of a closed water supply]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 2012, no 5, pp. 72-77.
8. Boeva L.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi* [Guidelines for chemical analysis of surface waters]. Part 1. Rostov-on-Don, 2009, 1046 p.
9. Genkel' P.A. *Fiziologiya rastenii* [Plant physiology]. Moscow, 1975, 336 p.
10. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Guidance on chemical analysis of soil]. Moscow, 1970, 487 p.
11. Aleksandrova L.N., Naidenova O.A. *Laboratorno-prakticheskie zanyatiya po pochvovedeniyu* [Laboratory and practical classes on soil science]. Leningrad, 1986, 295 p.
12. Pravdin I.F. *Rukovodstvo po izucheniyu ryb* [Guide to the study of fish]. Moscow, 1966, 376 p.
13. Kupinskii S.V., Baranov S.A., Reznikov V.F. [Rainbow trout - preliminary parameters of the standard model of mass accumulation]. *Industrial'noe rybovodstvo v zamknytykh sistemakh* [Industrial fish farming in closed systems]. Sat. scientific. tr. Moscow, 1985, vol. 46, pp. 109-115.
14. Men'shikov V.V. *Klinicheskaya laboratornaya analitika* [Clinical laboratory analytics]. Moscow, 2002, vol. 1, 860 p.
15. Metallov G.F., Geraskin P.P., Aksenov V.P., Levina O.A. Mnogoletnii monitoring fiziologicheskogo sostoyaniya osnovnykh vidov kaspiiskikh osetrovykh ryb [Long-term monitoring of the physiological state of the main species of Caspian sturgeon]. *Vestn. AGTU. Rybnoe khozyaistvo*, 2016, no 1, pp. 88-98.

### References

1. Zhigin A.V. *Zamknutyte sistemy v akvakul'ture* [Closed aquaculture system]. Moscow, 2011, 665 p.
2. Lennard W.A., Leonard B.V. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquacult. Int.*, 2006, vol. 14, no 6, pp. 539-550.
3. Lavrovskii V.V. *Puti intensifikatsii forelevodstva* [Ways to intensify the trout]. Moscow, 1981, 168 p.
4. Umpelev V.L., Mukhametshina E.N. [Rhythms of oxygen and pH in the RAS]. *Industrial'noe rybovodstvo v zamknytykh sistemakh* [Industrial fish farming in closed systems]. Sat. scientific. tr. Moscow, 1991, vol. 64, pp. 9-10.
5. Lavrovskii V.V., Zav'yalov A.P. *Metodicheskie razrabotki po kursu rybovodstva. Zamknutyte rybovodnye sistemy* [Methodical development of fish farming on the course. Closed-breeding system]. 1998. 96 s.
6. Matishov G.G., Matishov D.G., Ponomareva E.N., Sorokina M.N., Kazarnikova A.V., Kovalenko M.V. *Osnovy osetrovodstva v usloviyakh zamknutogo vodoobespecheniya dlya fermerskikh*

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 504.064.36:574

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-49-57

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОНОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ПОЧВАХ ТУЛЫМСКОГО КАМНЯ (ПЕРМСКИЙ КРАЙ)

© 2016 г. С.А. Бузмаков, Е.А. Дзюба

Бузмаков Сергей Алексеевич – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой биогеоценологии и охраны природы, географический факультет, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990, e-mail: lep@psu.ru

Дзюба Екатерина Алексеевна – магистрант, географический факультет, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990, e-mail: aea\_eco@mail.ru

Buzmakov Sergei Alekseevich – Doctor of Geographical Science, Professor, Head of the Department of Biogeocenology and Nature Protection, Geography Faculty, Perm State National Research University, Bukirev St., 15, Perm, 614990, Russia, e-mail: lep@psu.ru

Dzyuba Ekaterina Alekseevna – Master Student, Geography Faculty, Perm State National Research University, Bukirev St., 15, Perm, 614990, Russia, e-mail: aea\_eco@mail.ru

Приводятся данные по местному фоновому содержанию циклических элементов в почвах Тулымского Камня, расположенного на территории заповедника «Вишерский» Пермского края. Значения местного фонового содержания получены для 11 элементов: Sr, Pb, As, Zn, Cu, Ni, Co, Mn, Cr, V, Ti. Для этого были проведены измерения содержания элементов в почвах методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре «СПЕКТРОСКАН МАКС-G». Получены ряды элементов для 7 исследуемых фитоценозов горно-таежного и подгольцового поясов и Тулымского Камня в целом. В ходе анализа корреляционной матрицы между исследуемыми параметрами выявлены прямые и обратные зависимости. Представлены местные фоновые содержания циклических элементов для исследуемых фитоценозов: елово-пихтового леса кистлично-мелкопапоротникового; смешанного леса; пихтово-елового леса чернично-мелкопапоротникового; пихтово-елового леса – черничника; ельника-черничника; березово-пихтового горного редколесья; разреженного смешанного леса – черничника; для горно-таежного и подгольцового поясов; для Тулымского Камня. Установлена зависимость содержания элементов в почвах в зависимости от высоты расположения станций отбора проб над уровнем моря. Полученные данные рекомендованы для использования при экологических исследованиях территорий.

**Ключевые слова:** заповедник «Вишерский», местное фоновое содержание, метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии, Тулымский Камень, тяжелые металлы, циклические элементы.

Data for local background regular elements content in soils of Tulyum Rock situated on the territory of Vishera Reserve in Perm Region is given. The local background content values for 11 elements including Sr, Pb, As, Zn, Cu, Ni, Co, Mn, Cr, V, Ti were received. For this purpose measurements of soil element content using X-ray fluorescence spectrometry on spectrophotometer «SPECTROSCAN MAX-G» were conducted. Numbers of elements were acquired for 7 phytocenoses of mountain taiga belt, pregolets belt and for Tulyum Rock in whole. During analysis of correlation matrix direct and reverse dependencies between parameters investigated were revealed. Local background regular elements content values were presented for spruce-fir-sorrel-fine-fern forest, mixed forest, fir-spruce-bilberry-fine-fern forest, fir-spruce bilberry forest, bilberry spruce forest, sparse birch-fir montane forest, broken mixed bilberry forest; for mountain taiga and pregolets belts; for Tulyum Rock. Dependence of soils elements content on elevation of field stations was determined. Data received could be recommended for environmental investigations purposes.

**Keywords:** Vishera Reserve, local background content, X-ray fluorescence spectrometry, Tulyum Rock, heavy metals, regular elements.

Закон В.И. Вернадского о всеобщем рассеянии химических элементов утверждает, что во всех природных объектах есть все химические элементы, но их распространение носит неравномерный характер [1]. Почва как биокосная система не является исключением из данного закона. В различных природных комплексах элементы распределены неравномерно. Знание содержания химических элементов в исследуемой системе или отдельном объекте помогает в решении различных экологических проблем. Для этих целей необходимо знать эталонные содержания

химических элементов в подобных системах или объектах. Почва относится к числу особо важных объектов исследования в данной проблеме [2, 3].

В зависимости от геологического строения и преимущественного наличия в отдельных регионах пород того или иного типа среднее содержание некоторых химических элементов в них может существенно отличаться от среднего содержания этих же элементов в других регионах и от кларка земной коры в целом [2]. По мнению В.И. Вернадского, для практических задач нужно исходить не из кларков, а из среднего состава

пород биосферы данной местности [1]. Чтобы охарактеризовать общие геохимические особенности таких регионов, было введено такое понятие, как «местные, или региональные, кларки» [2]. Они представляют собой среднее содержание химических элементов в земной коре определенных регионов и могут быть массовыми, атомными, объемными.

Содержание многих химических элементов зависит от хозяйственного использования территории [4–6]. Это привело к тому, что во многих случаях установить кларки для почв до антропогенного воздействия на них практически невозможно.

Большая работа по изучению распределения химических элементов в почвах, особенно в европейской части России, была проведена А.П. Виноградовым. Но к настоящему времени кларки многих элементов подлежат уточнению [2] в связи с возрастающей и неравномерной антропогенной нагрузкой на природные комплексы.

Чтобы выявить местное фоновое содержание, нужно выбрать территорию, которая относится к данной области, подвергается и подверглась раньше минимальному загрязнению по сравнению

с территориями, испытывающими постоянную антропогенную нагрузку. Загрязнения, произошедшие в результате техногенеза за последнее время, повлияли на корректность имеющихся данных по кларкам почв. Почва в таком случае является депонирующей средой, а загрязнение происходит неравномерно, из чего следует, что для каждого региона необходимо устанавливать свои фоновые местные содержания [7].

В данном исследовании фоновой территорией стал заповедник «Вишерский», который, исходя из своего природоохранного статуса, ограничен от хозяйственной деятельности, а значит, подвергается минимальному загрязнению, которое может происходить в основном трансграничными путями в атмосфере [8], причем доля атмосферных осадков в поставке тяжелых металлов составляет 25÷50 % от выноса их с речным стоком [9]. Заповедник удален от источников антропогенной нагрузки, его территория располагается на крайнем северо-востоке Пермского края (рис. 1), в верховьях реки Вишеры, относится к Центрально-Уральской области ландшафтной страны Урал [10, 11].

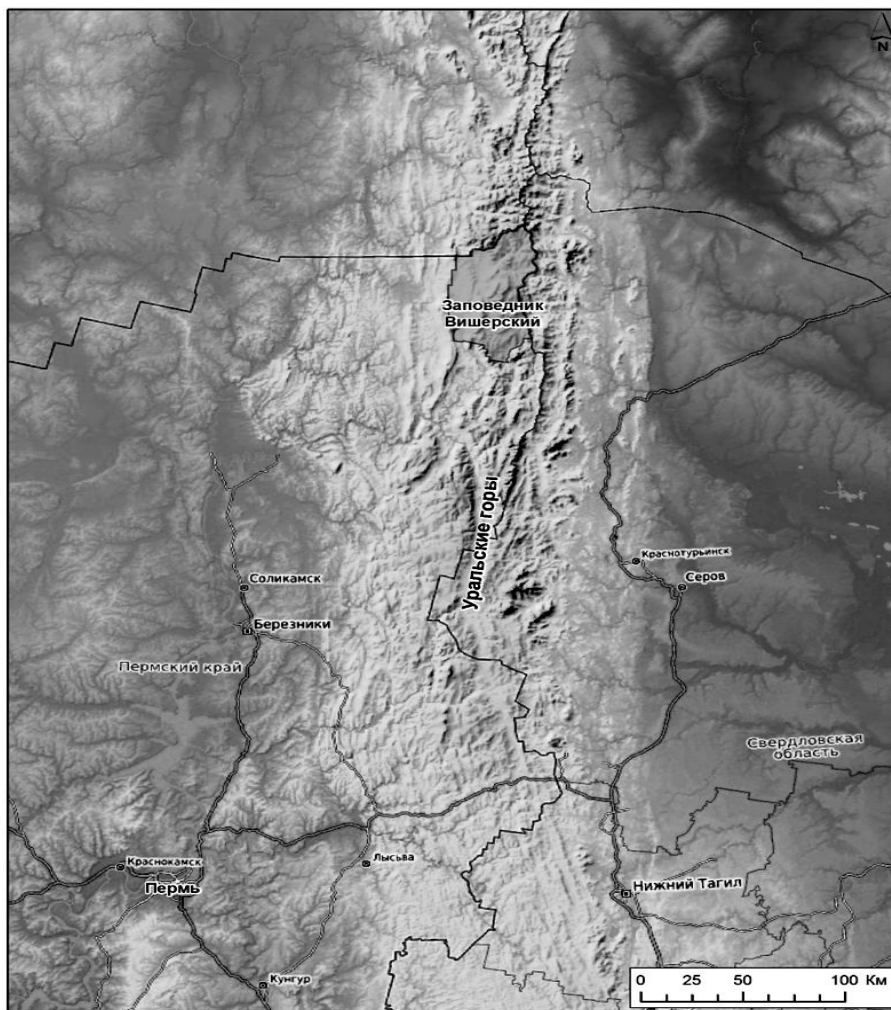


Рис. 1. Географическое расположение заповедника «Вишерский»

По более узкому районированию – к верхне-вишерскому ландшафту складчатых и складчато-глыбовых среднегорий [12]. По природному районированию территория Тулымского Камня принадлежит северотаежной зоне с горными лесами и тундрами [13], в которой выделяются горно-таежный и подгольцовый пояса [14].

Цель исследования заключается в определении местного фонового содержания циклических элементов в почвах Тулымского Камня. Для ее достижения были поставлены следующие задачи: разработка маршрута обследования территории; отбор проб, геоботаническое и почвенное обследование исследуемых площадок; геохимический анализ почвенных проб; статистическая обработка и вычисление местного фонового содержания циклических элементов.

Исследования в предыдущие годы [8, 15] показали тенденцию к увеличению содержания в почвах циклических элементов. Исходя из выводов П.Н. Бахарева и др. [15], увеличение содержания загрязняющих веществ в почвах обусловлено возрастающей антропогенной нагрузкой.

Важно отметить, что установление фонового содержания необходимо для изучения экологического состояния региона [7], так как до настоящего времени для данной территории не были определены местные фоновые содержания циклических элементов.

### Материал и методика

В ходе исследования были заложены пробные площадки в фитоценозах на разных высотах в районе Тулымского Камня.

В основу отбора проб были положены метод конверта и геохимическая съемка. Пробоподготовка осуществлялась с учетом специфики измерения содержания тяжелых металлов методом рентгено-флуоресцентной спектрометрии. Для этого было необходимо подготовить таблетки из перетертых почвенных образцов на подложке из борной кислоты. Почва перетиралась в агатовой ступке и просеивалась через сито с диаметром ячеек 50 мкм. В результате такой подготовки были изготовлены максимально однородные образцы для получения результатов с погрешностью измерений, установленной для спектрометра «СПЕКТРОСКАН МАКС-G».

В каждой пробе определялось валовое содержание 11 циклических элементов: Sr, Pb, As, Zn, Cu, Ni, Co, Mn, Cr, V, Ti. Определение именно ва-

лового содержания обосновано при экологическом обследовании территории [16, 17].

Для полученных результатов была проведена статистическая обработка с применением Microsoft Excel 2007, в ходе которой были определены следующие параметры: среднее содержание элемента в почве ( $\bar{x}$ , мг/кг), стандартное отклонение ( $\sigma$ ), стандартная ошибка среднего (SE), доверительный интервал (CI), коэффициент вариации (CV, %). На основе этих данных рассчитана корреляция между определяемыми параметрами; проанализировано их распределение по отношению к высоте над уровнем моря.

### Результаты и обсуждение

Результаты по содержанию металлов в исследуемых фитоценозах представлены в табл. 1. Всего исследовано 7 фитоценозов горно-таежного и подгольцового поясов, которые распределены с юга на север и с запада на восток (рис. 2).

Исследуемые площадки находятся на высоте от 284 до 618 м над уровнем моря (м н.у.м).

Исследуемые почвы относятся к горно-подзолистым, кислым, по гранулометрическому составу являются средне- и тяжелосуглинистыми. Средняя кислотность почв – 4,3. Исходя из полученных данных рядов элементов можно выделить пять групп:

1. Елово-пихтовый лес кислично-мелкопапоротниковый с характерным рядом элементов:

Ti>Mn>Cr>V>Zn>Sr>Cu>Ni>Pb>Co>As.

2. Смешанный лес; пихтово-еловый; чернично-мелкопапоротниковый; пихтово-еловый черничник. Характерный ряд элементов:

Ti>Mn>Cr>Sr> > Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As.

3. Ельник-черничник. Характерный ряд элементов:

Ti>Mn>Cr>V>Sr>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As.

4. Березово-пихтовое горное редколесье. Характерный ряд элементов:

Ti>Cr>Mn>V>Sr>Cu>o> > i>Zn>Pb>As.

5. Разреженный смешанный лес – черничник. Характерный ряд элементов:

Ti>Mn>Cr>V>Sr>Cu> > n>Ni>Pb>As>Co.

Распределение титана, марганца и хрома имеет однородный характер, за исключением березово-пихтового горного редколесья, где содержание марганца меньше, чем стронция. Далее наблюдаются различные вариации по распределению ванадия и стронция. Для разреженного леса – черничника меньшее содержание отмечено для кобальта.

Таблица 1

## Средние значения содержания элементов в почвенных образцах

Основные параметры	Циклические элементы										
	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V	Ti
<i>Елово-пихтовый лес кислотно-мелкопапоротниковый (284 м н.у.м.)</i>											
$\bar{x}$	69,59	14,12	7,82	85,48	44,89	34,61	12,92	514,66	137,10	110,26	10806
$\sigma$	3,078	3,084	1,737	7,932	1,690	0,938	0,960	43,269	5,454	5,867	2732
SE	1,256	1,256	1,259	0,709	3,238	0,690	0,383	0,392	17,664	2,227	1115
CI ( $\pm$ )	3,230	3,230	3,237	1,823	8,326	1,774	0,984	1,008	45,415	5,725	2876
CV, %	4,423	21,833	22,22	9,280	3,766	2,710	7,432	8,407	3,978	5,322	25,285
<i>Смешанный лес (310 м н.у.м.)</i>											
$\bar{x}$	106,27	22,47	7,98	68,10	42,08	33,80	13,21	627,00	131,17	79,53	6963
$\sigma$	3,544	0,472	0,289	1,674	0,735	1,607	0,661	6,622	2,294	4,580	176
SE	2,046	0,273	0,167	0,966	0,424	0,928	0,382	3,823	1,324	2,644	101,7
CI ( $\pm$ )	8,804	1,173	0,719	4,158	1,825	3,993	1,642	16,45	5,699	11,38	438
CV, %	3,335	2,101	3,627	2,458	1,746	4,755	5,001	1,056	1,749	5,759	2,5
<i>Пихтово-еловый лес чернично-мелкопапоротниковый (333 м н.у.м.)</i>											
$\bar{x}$	106,29	18,25	6,82	58,95	46,86	29,85	11,72	544,55	143,06	88,66	9380
$\sigma$	0,901	0,815	0,281	0,730	1,147	0,437	0,565	1,235	0,628	1,115	204
Основные параметры	Циклические элементы										
	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V	Ti
SE	0,520	0,470	0,162	0,421	0,662	0,252	0,326	0,713	0,363	0,644	117,9
CI ( $\pm$ )	2,238	2,024	0,697	1,813	2,850	1,086	1,403	3,067	1,560	2,77	507
CV (%)	0,848	4,464	4,113	1,238	2,448	1,465	4,821	0,227	0,439	1,258	2,2
<i>Пихтово-еловый лес – черничник (341 м н.у.м.)</i>											
$\bar{x}$	122,03	20,59	9,60	50,42	47,43	28,61	8,93	383,97	128,60	95,58	9130
$\sigma$	6,853	0,959	0,468	1,484	1,796	1,414	0,263	1,235	0,805	0,258	373
SE	3,957	0,554	0,270	0,857	1,037	0,816	0,152	0,713	0,465	0,149	215,5
CI ( $\pm$ )	17,026	2,382	1,162	3,688	4,463	3,513	0,653	3,067	2,001	0,642	927
CV, %	5,616	4,657	4,869	2,944	3,787	4,942	2,945	0,227	0,626	0,270	4,1
<i>Ельник-черничник (374 м н.у.м.)</i>											
$\bar{x}$	88,71	12,64	7,44	49,65	45,69	28,91	11,59	522,02	128,37	101,72	9387
$\sigma$	0,249	0,203	0,399	0,123	1,162	0,129	0,390	0,520	1,150	0,552	386
SE	0,144	0,117	0,230	0,071	0,671	0,075	0,225	0,300	0,664	0,319	222,6
CI ( $\pm$ )	0,620	0,505	0,991	0,306	2,887	0,321	0,969	1,292	2,856	1,373	958
CV, %	0,281	1,608	5,360	0,248	2,543	0,447	3,365	0,100	0,896	0,543	4,1
<i>Березово-пихтовое горное редколесье (618 м н.у.м.)</i>											
$\bar{x}$	49,64	16,34	3,15	25,15	44,15	32,16	33,02	115,96	164,88	50,99	7530
$\sigma$	1,159	0,548	0,385	0,200	0,751	0,619	1,400	0,948	0,989	0,932	610
SE	0,669	0,316	0,222	0,116	0,434	0,357	0,808	0,547	0,571	0,538	352,0
CI ( $\pm$ )	2,878	1,361	0,957	0,498	1,867	1,538	3,478	2,354	2,457	2,315	1514
CV, %	2,334	3,352	12,24	0,797	1,702	1,925	4,239	0,817	0,600	1,827	8,1
<i>Разреженный смешанный лес – черничник (545 м н.у.м.)</i>											
$\bar{x}$	45,58	11,66	5,82	22,95	43,77	15,70	1,00	142,06	118,01	70,83	8857
$\sigma$	0,609	0,504	0,348	0,157	1,271	0,246	0,065	0,813	1,841	1,057	237
SE	0,352	0,291	0,201	0,090	0,734	0,142	0,037	0,469	1,063	0,610	136,8
CI ( $\pm$ )	1,513	1,253	0,864	0,389	3,158	0,611	0,161	2,019	4,575	2,627	589
CV, %	1,336	4,326	5,981	0,682	2,904	1,568	6,480	0,572	1,560	1,493	2,7

Проведена корреляция и составлена корреляционная матрица (табл. 2), в которой отмечены парная зависимость или ее отсутствие между содержанием элементов и их распределением относительно высоты над уровнем моря. Наиболее высокая зависимость отмечена для цинка с никелем, марганцем и ванадием, кобальта и хрома, ванадия и титана.

По выраженности парной зависимости выделены 4 группы. Высокая зависимость отмечена для цинка с никелем, марганцем, ванадием; кобальта с хромом; ванадия с титаном.

Средняя положительная зависимость выявлена у стронция со свинцом, мышьяком и марганцем; мышьяка с марганцем; меди с ванадием и титаном; никеля с кобальтом, марганцем и хромом; марганца с ванадием.

Средняя обратная зависимость, при которой отмечено увеличение содержания одного элемента и уменьшение содержания другого, прослеживается для мышьяка с хромом.

К четвертой группе относим остальные пары элементов со слабой и отсутствующей зависимостью.

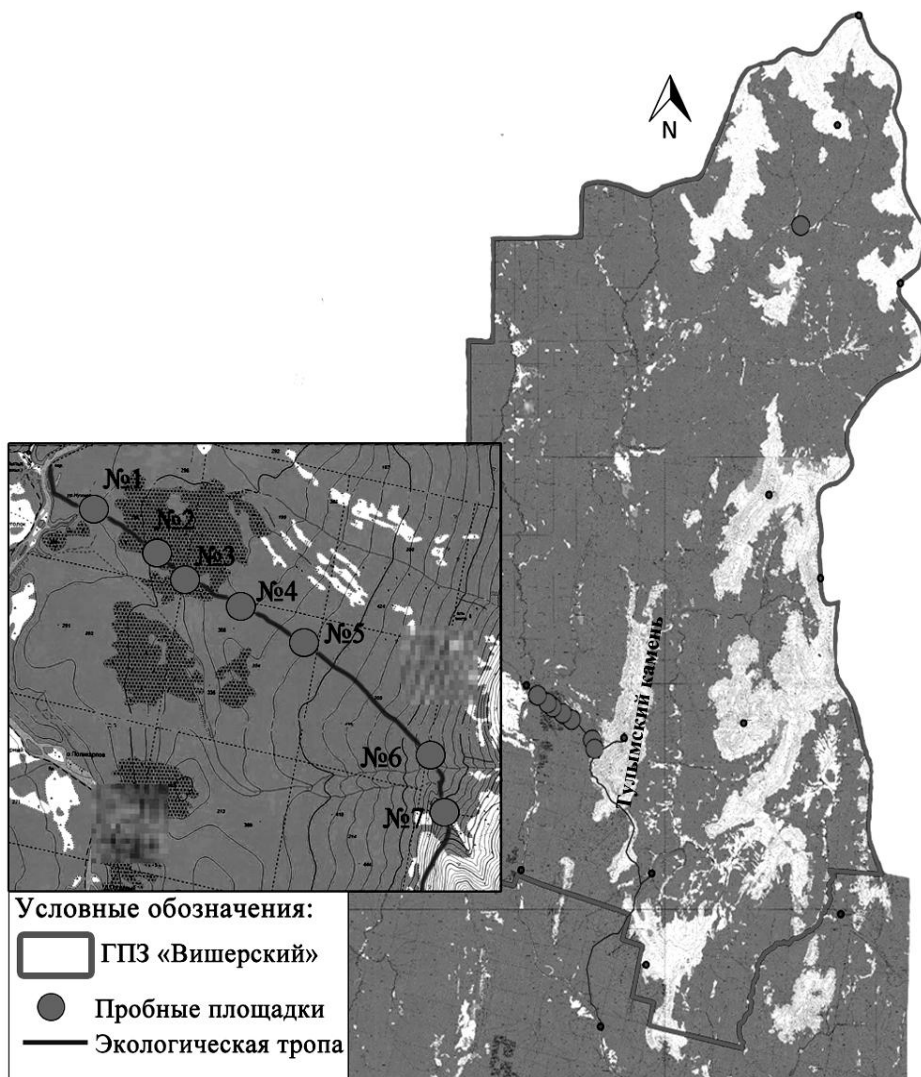


Рис. 2. Точки отбора проб

Таблица 2

Корреляционная матрица для анализируемых параметров исследуемых почв\*

Циклические элементы	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V	Ti	Высота, м н.у.м.
Sr	0,51	0,65	0,32	0,37	0,25	-0,21	0,66	-0,25	0,23	-0,04	-0,64
Pb		-0,09	0,23	0,22	0,45	0,05	0,28	0,39	0,20	0,29	-0,20
As			0,43	0,13	0,07	-0,47	0,58	-0,62	0,39	-0,11	-0,76
Zn				0,09	0,71	-0,15	0,82	-0,01	0,71	0,12	-0,89
Cu					0,09	-0,19	0,06	0,21	0,52	0,68	-0,20
Ni						0,51	0,55	0,58	0,42	0,08	-0,50
Co							-0,23	0,70	-0,45	-0,37	0,37
Mn								-0,22	0,55	-0,01	-0,92
Cr									0,03	0,34	0,30
V										0,72	-0,69
Ti											-0,07

\* – степень корреляции между параметрами: 0,01–0,19 – отсутствует; 0,2–0,49 – слабая; 0,5–0,69 – средняя; 0,7–0,99 – высокая.

Важное значение имеют корреляция элементов с высотой над уровнем моря (табл. 2) и распределение по содержанию элементов относительно высоты над уровнем моря (рис. 3).

Высокая обратная зависимость характерна для мышьяка, цинка и марганца. Стронций, никель и ванадий проявляют среднюю обратную зависимость

между их концентрацией в почве и высотой над уровнем моря. Несущественно выражены тренды на понижение концентрации у свинца и меди (слабая отрицательная корреляция), на повышение содержания кобальта и хрома (слабая положительная корреляция). Распределение титана не зависит от высоты над уровнем моря (корреляция отсутствует).

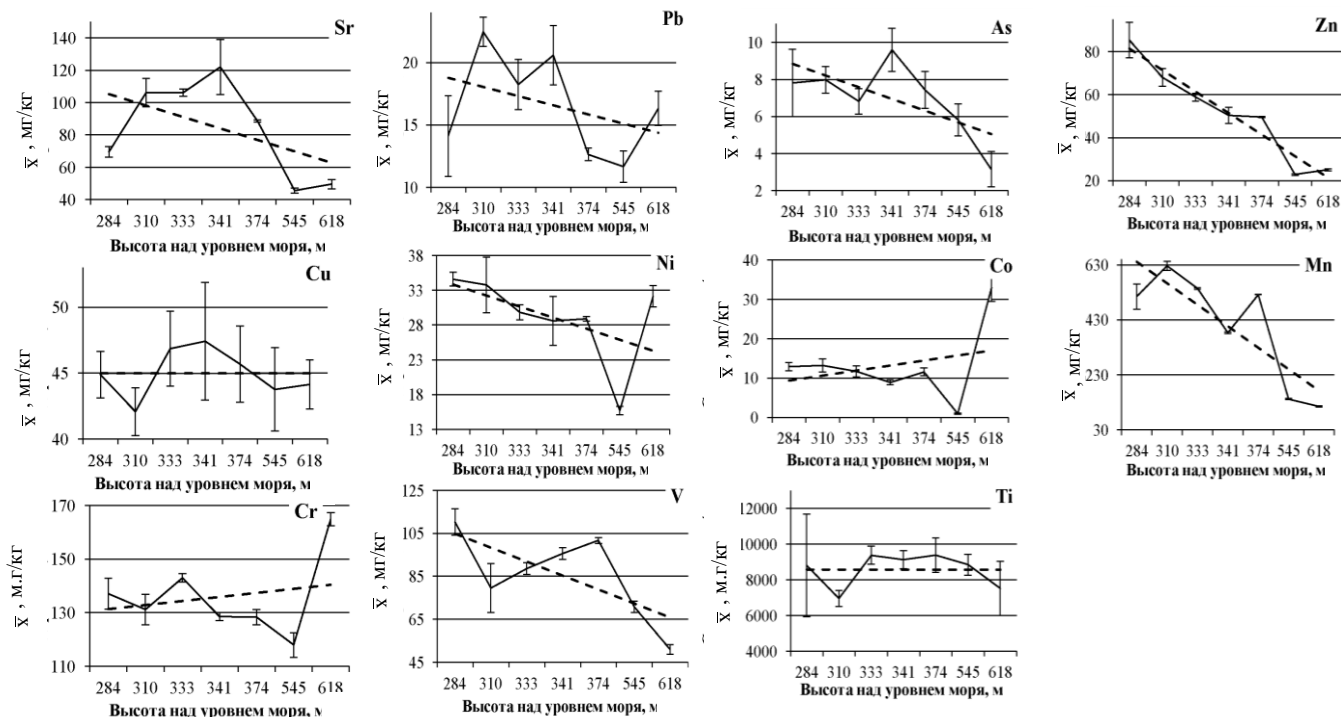


Рис. 3. Распределение содержания элементов относительно высоты над уровнем моря

Исходя из проведенной статистической обработки, можно говорить о том, что прослеживаются ряды закономерностей при достаточной выборке. Необходимо отметить относительно небольшой разброс и выравненность исследуемых значений в отобранных пробах почв. Исключением являются результаты по кислотно-мелкопапоротниковому елово-пихтовому лесу. Здесь наблюдается значительная степень вариации (20÷33 %) для значений по содержанию свинца, мышьяка и титана. Данный разброс значений допускается по применяемой методике [18]. Полученное среднее значение позволяет говорить, что оно наиболее точно показывает содержание этих элементов на исследуемой территории.

Зависимость содержания элементов от высоты над уровнем моря может иметь ряд причин. Во-первых, с изменением высоты происходит изменение метеорологических условий. Тяжелые металлы переносятся с воздушными массами из западных и южных районов европейской части России. С севера и востока проникают воздушные массы, содер-

жащие меньше тяжелых металлов. На высотах около 600 м, по-видимому, превалирует атмосферный перенос воздушных масс с запада и востока. Косвенно на это указывает то, что обратные связи с высотой местности имеют содержание таких элементов, как свинец, цинк, мышьяк, медь, никель, т.е. входящих в список так называемых приоритетных тяжелых металлов. Несколько особняком стоят такие следовые элементы, как ванадий, марганец и стронций. Их распределение может контролироваться исключительно природными факторами и процессами. Во-вторых, при изменении высоты (в данном случае на 334 м) происходит изменение подстилающих пород и почвенного покрова. В-третьих, происходит смена фитоценозов с характерным уменьшением разнообразия и проективного покрытия растительного покрова. Обратное распределение тяжелых металлов с высотой местности, вероятно, связано с вертикальной дифференциацией следовых элементов, обусловленной выветриванием горных пород, выщелачиванием микроэлементов и их переносом вниз по склону.



Имеющие место флуктуации и зависимости определяются природными факторами и процессами.

В табл. 3 представлено содержание циклических элементов в почвах Тулымского Камня, горно-таежного и подгольцового поясов в почвах.

Для горно-таежного, подгольцового поясов и Тулымского Камня в целом характерны следующие ряды элементов:

Горно-таежный пояс:

Ti>Mn>Cr>V>Sr>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As.

Подгольцовый пояс:

Ti>Cr>Mn>V>Sr>Cu>Zn>Ni>Co>Pb>As.

Тулымский Камень:

Ti>Mn>Cr>V>Sr>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As.

Статистическая достоверность полученных данных (табл. 1, 3) позволяет говорить о том, что в ходе данного исследования были получены местные фоновые содержания циклических элементов для Тулымского Камня, которые могут использоваться как эталонные показатели.

Таблица 3

**Местное фоновое содержание циклических элементов в почвах горно-таежного и подгольцового поясов Тулымского Камня**

Циклические элементы	Горно-таежный пояс			Подгольцовый пояс			Тулымский Камень		
	$\bar{x}$	ДИ ( $\pm$ )	CV, %	$\bar{x}$	ДИ ( $\pm$ )	CV, %	$\bar{x}_r$	ДИ ( $\pm$ )	CV, %
Sr	94,23	21,88	22,12	47,61	5,22	6,03	82,58	23,65	30,32
Pb	18,75	4,88	24,81	14,00	6,02	23,64	17,56	4,49	28,31
As	7,43	1,62	20,76	4,49	3,43	42,10	6,69	1,37	21,30
Zn	62,76	13,96	21,20	24,05	2,83	6,47	53,08	17,28	33,88
Cu	45,65	2,08	4,34	43,96	0,49	0,61	45,23	1,74	4,28
Ni	31,70	3,01	9,04	23,93	21,16	48,64	29,76	5,89	22,40
Co	11,31	1,84	15,49	17,01	41,16	133,11	12,74	3,77	42,82
Mn	498,09	97,33	18,62	129,01	33,55	14,31	405,82	142,11	35,55
Cr	138,32	13,37	9,21	141,45	60,25	23,43	139,10	12,46	10,29
V	100,61	17,88	16,93	60,91	25,5	23,03	90,68	17,16	19,92
Ti	9668	1816	18,54	8195	1702	11,42	9300	1421	17,16

Учитывая данный факт при проведении экологического мониторинга на территориях, которые подвергаются значительной антропогенной нагрузке, можно делать более реалистичные выводы о загрязнении, потому что имеющиеся на данный момент фоновые содержания становятся все менее актуальными при ус-

ловии постоянной нарастающей антропогенной нагрузки, и только территории, извлеченные из хозяйственного использования, могут быть эталонными.

В табл. 4 представлен расчет долей предельно допустимых концентраций (ПДК), ориентировочно допустимых концентрации (ОДК).

Таблица 4

**Оценка содержания циклических элементов в почвах Тулымского Камня, доли ПДК**

Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V	Ti
ПДК (ОДК*) [19, 20]										
–	32	5*	110*	66*	40*	–	1500	–	150	–
<i>Елово-пихтовый лес кислично-мелкопапоротниковый (284 м н.у.м.)</i>										
–	0,4	1,6	0,8	0,7	0,9	–	0,3	–	0,7	–
<i>Смешанный лес (310 м н.у.м.)</i>										
–	0,7	1,6	0,6	0,6	0,8	–	0,4	–	0,5	–
<i>Пихтово-еловый лес чернично-мелкопапоротниковый (333 м н.у.м.)</i>										
–	0,6	1,4	0,5	0,7	0,7	–	0,4	–	0,6	–
<i>Пихтово-еловый лес – черничник (341 м н.у.м.)</i>										
–	0,6	1,9	0,5	0,7	0,7	–	0,3	–	0,6	–
<i>Ельник-черничник (374 м н.у.м.)</i>										
–	0,4	1,5	0,5	0,7	0,7	–	0,3	–	0,7	–
<i>Березово-пихтовое горное редколесье (618 м н.у.м.)</i>										
–	0,5	0,6	0,2	0,7	0,8	–	0,1	–	0,3	–
<i>Разреженный смешанный лес – черничник (545 м н.у.м.)</i>										
–	0,4	1,2	0,2	0,7	0,4	–	0,1	–	0,5	–

Исходя из полученных расчетов долей ПДК (ОДК), заключаем, что повышенное содержание

наблюдается у мышьяка на всех площадках, кроме березово-пихтового горного редколесья, где это

значение равно 0,6 ОДК. Содержание остальных элементов находится в пределах допустимых норм.

### Заключение

По результатам исследования можно сделать вывод о местных фоновых содержаниях циклических элементов (Sr, Pb, As, Zn, Cu, Ni, Co, Mn, Cr, V, Ti) в почвах Тулымского Камня внутри типичных фитоценозов. Было рассмотрено 7 фитоценозов: елово-пихтовый лес кислично-мелкопапоротниковый; смешанный; пихтово-еловый чернично-мелкопапоротниковый; пихтово-еловый черничник; ельник-черничник; березово-пихтовое горное редколесье; разреженный смешанный лес – черничник. Сводные данные по местному фоновому содержанию исследуемых циклических элементов могут быть использованы при экологических исследованиях территорий в качестве фоновых. Заповедные экосистемы должны учитываться как эталонные показатели. Исследования на таких территориях должны быть положены в основу разработок местных фоновых содержаний.

По содержанию циклических элементов в почвах были составлены ряды элементов. Исследуемые фитоценозы по рядам элементов разделены на 5 групп: елово-пихтовый лес кислично-мелкопапоротниковый; Ti>Mn>Cr>V>Zn>Sr>Cu>Ni>Pb>Co>As; смешанный лес; пихтово-еловый; чернично-мелкопапоротниковый; пихтово-еловый черничник Ti>Mn>Cr>Sr>V>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As; ельник-черничник с характерным рядом элементов: Ti>Mn>Cr>V>Sr>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As; березово-пихтовое горное редколесье с характерным рядом элементов: Ti>Cr>Mn>V>Sr>Cu>Co>Ni>Zn>Pb>As; разреженный смешанный лес – черничник Ti>Mn>Cr>V>Sr>Cu>Zn>Ni>Pb>As>Co.

Отдельно составлены ряды элементов для поясов:

– горно-таежного

(Ti>Mn>Cr>V>Sr>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As);

– подгольцового

(Ti>Cr>Mn>V>Sr>Cu>Zn>Ni>Co>Pb>As);

– Тулымского Камня

(Ti>Mn>Cr>V>Sr>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>As).

Высокую обратную зависимость между концентрацией элементов и высотой над уровнем моря проявляют мышьяк, цинк и марганец, среднюю – стронций, никель и ванадий. Практически отсутствует зависимость у кобальта, хрома, свинца, меди и титана.

Высокая взаимосвязь выявлена для цинка с никелем, марганцем, ванадием; кобальта с хромом; ванадия с титаном.

Выявленные флуктуации и зависимости в основном определяются природными факторами и процессами, прежде всего изменением почвообра-

зовательного процесса в зависимости от высотной поясности.

### Литература

1. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., 2001. 376 с.
2. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М., 2000. 627 с.
3. Алексеенко В.А., Суворинов А.В., Алексеенко В.А., Бофанова А.Б. Металлы в окружающей среде. Почвы геохимических ландшафтов Ростовской области. М., 2002. 312 с.
4. Зимовец А.А., Федоров Ю.А. Тяжелые металлы в почвах устьевой области реки Северная Двина // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 5. С. 70–74.
5. Пинский Д.Л., Минкина Т.М., Манджиева С.С., Федоров Ю.А., Бауэр Д.Г., Невидомская Т.В. Особенности поглощения Cu(II), Pb(II) и Zn(II) черноземом обыкновенным из растворов нитратов, хлоридов, ацетатов и сульфатов // Почвоведение. 2014. № 1. С. 22–29.
6. Минкина Т.М., Манджиева С.С., Федоров Ю.А., Сушкова С.Н., Бурачевская М.В., Невидомская Д.Г., Антоненко Е.М., Калинин В.П., Ендовицкий А.П., Ильин В.Б., Черненко В.В., Бакоев С.Ю. Способ оценки степени деградации техноландшафта при химическом загрязнении // Stredoevropsky vestnik pro vedu a vyzkum. 2015. Т. 76. С. 89.
7. Алексеенко В.А., Бузмаков С.А., Панин М.С. Геохимия окружающей среды. Пермь, 2013. 359 с.
8. Хайрулина Е.А., Ворончихина Е.А. Оценка современного биогеохимического состояния заповедных экосистем Пермского края // Вестн. Перм. ун-та. Биология. 2007. № 5. С. 155–160.
9. Доценко И.В., Федоров Ю.А. Оценка осаждения тяжелых металлов мидией (*Mytilus galloprovincialis* Lam.) в морских экосистемах. Ростов н/Д., М., 2012. 221 с.
10. Бузмаков С.А., Зайцев А.А. Состояние региональных особо охраняемых природных территорий Пермского края // Вестн. Удмурт. ун-та. Биология. Науки о Земле. 2011. № 6–3. С. 3–12.
11. Бузмаков С.А., Зайцев А.А., Санников П.Ю. Выявление территорий, перспективных для создания природного парка в Пермском крае // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2011. Т. 13, № 1 (6). С. 1492–1495.
12. Атлас Пермского края / под общ. ред. А.М. Тартаковского. Пермь, 2012. 124 с.
13. Чибилев А.А., Чибилев Ант. А. Природное районирование Урала с учетом широтной зональности, высотной поясности и вертикальной дифференциации ландшафтов // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1 (6). С. 1660–1665.
14. Бахарев П.Н., Семенов В.В., Андреев Д.Н. Геоинформационная база данных территории заповедника «Вишерский» // Геогр. вестн. 2015. № 2. С. 56–62.
15. Бахарев П.Н., Ворончихина Е.А., Ильиных С.И., Лоскутова Н.М. Технофильные элементы в особо охраняемых экосистемах западноуральской тайги // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1(8). С. 2136–2139.
16. Андреев Д.Н. Экогеохимическая диагностика антропогенной трансформации особо охраняемых природных территорий // Вестн. Удмурт. ун-та. Биология. Науки о Земле. 2013. № 3. С. 3–9.
17. Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Манджиева С.С., Козлова М.Н. Особенности содержания и

- подвижность тяжелых металлов в почвах реки Дон // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22, № 1 (66). С. 86–98.
18. ПНД Ф 16.1.42-04. Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв рентгенофлуоресцентным методом. С.-Прб., 2010. 50 с.
  19. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М., 2006.
  20. ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве от 18.05.2009 г. № 32. URL: consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_88788 / (дата обращения: 20.03.2016).

### References

1. Vernadskii V.I. *Khimicheskoe stroenie biosfery Zemli i ee okruzheniya* [The chemical structure of the Earth's biosphere and its environment]. Moscow, 2001, 376 p.
2. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Environmental geochemistry]. Moscow, 2000, 627 p.
3. Alekseenko V.A., Suvorinov A.V., Alekseenko V.Ap., Bofanova A.B. *Metally v okruzhayushchei srede. Pochvy geokhimicheskikh landshaftov Rostovskoi oblasti* [Metals in the environment. Soil geochemical landscapes of Rostov Region]. Moscow, 2002, 312 p.
4. Zimovets A.A., Fedorov Yu.A. Tyazhelye metally v pochvakh ust'voio oblasti reki Severnaya Dvina [Heavy metals in the soils of the mouth area of the Northern Dvina]. *Izv. Vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 2013, no 5, pp. 70-74.
5. Pinskii D.L., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Fedorov Yu.A., Bauer D.G., Nevidomskaya T.V. Osobennosti pogloshcheniya Cu(II), Pb(II) i Zn(II) chernozemom obyknovennym iz rastvorov nitratov, khloridov, atsetatov i sulfatov [Absorption properties Cu (II), Pb (II) and Zn (II) nitrate of ordinary chernozem solutions of chlorides, sulfates and acetates]. *Pochvovedenie*, 2014, no 1, pp. 22-29.
6. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Fedorov Yu.A., Sushkova S.N., Burachevskaya M.V., Nevidomskaya D.G., Antonenko E.M., Kalinichenko V.P., Endovitskii A.P., Il'in V.B., Chemenko V.V., Bakoev S.Yu. Sposob otsenki stepeni degradatsii tekhnolandshafta pri khimicheskom zagryaznenii [A method of estimating the degree tehnolandshafta degradation by chemical contamination]. *Stredoevropsky vestnik pro vedu a vyzkum*, 2015, vol. 76, p. 89.
7. Alekseenko V.A., Buzmakov S.A., Panin M.S. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of the environment]. Perm, 2013, 359 p.
8. Khairulina E.A., Voronchikhina E.A. Otsenka sovremennogo biogeokhimicheskogo sostoyaniya zapovednykh ekosistem Permskogo kraia [Assessment of the current state of the Perm Region protected ecosystem]. *Vestn. Perm. un-ta. Biologiya*, 2007, no 5, pp. 155-160.
9. Dotsenko I.V., Fedorov Yu.A. *Otsenka osazhdeniya tyazhelykh metallov midiei (Mytilus galloprovincialis Lam.) v morskikh ekosistemakh* [Evaluation of heavy metal deposition mussel (*Mytilus galloprovincialis* Lam.) in marine ecosystems]. Rostov-on-Don; Moscow, 2012, 221 p.
10. Buzmakov S.A., Zaitsev A.A. Sostoyanie regional'nykh osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii Permskogo kraia [State of regional protected areas of the Perm Region]. *Vestn. Udmurt. un-ta. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2011, no 6-3, pp. 3-12.
11. Buzmakov S.A., Zaitsev A.A., Sannikov P.Yu. Vyyavlenie territorii, perspektivnykh dlya sozdaniya prirodnogo parka v Permskom krae [Identify areas, promising to create a natural park in the Perm Region]. *Izv. Samar. nauch. tsentra RAN*, 2011, vol. 13, no 1 (6), pp. 1492-1495.
12. *Atlas Permskogo kraia* [Atlas of the Perm Region]. Ed. A.M. Tartakovsky. Perm, 2012, 124 p.
13. Chibilev A.A., Chibilev Ant. A. Prirodnoe raionirovanie Urala s uchetom shirotnoi zonal'nosti, vysotnoi poynasnosti i vertikal'noi differentsiatsii landshaftov [Natural zoning of the Urals given latitudinal zonation, altitudinal zones, and vertical differentiation of landscapes]. *Izv. Samar. nauch. tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no 1 (6), pp. 1660-1665.
14. Bakharev P.N., Semenov V.V., Andreev D.N. Geoinformatsionnaya baza dannykh territorii zapovednika «Visherskii» [Geographic Information database of the reserve «Vishera»]. *Geogr. vestn.*, 2015, no 2, pp. 56-62.
15. Bakharev P.N., Voronchikhina E.A., Il'inykh S.I., Loskutova N.M. Tekhnofil'nye elementy v osobo okhranyaemykh ekosistemakh zapadnoural'skoi taigi [Technophil elements of protected ecosystems of the Western Ural taiga]. *Izv. Samar. nauch. tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no 1(8), pp. 2136-2139.
16. Andreev D.N. Ekogeokhimicheskaya diagnostika antropogennoi transformatsii osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii [Ecogeochemical diagnosis of anthropogenic transformation of protected areas]. *Vestn. Udmurt. un-ta. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2013, no 3, pp. 3-9.
17. Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Kozlova M.N. Osobennosti sodержaniya i podvizhnost' tyazhelykh metallov v pochvakh reki Don [Features of content and mobility of heavy metals in the soils of the river Don]. *Aridnye ekosistemy*, 2016, vol. 22, no 1 (66), pp. 86-98.
18. ПНД Ф 16.1.42-04. Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв рентгенофлуоресцентным методом [PND F 16.1.42-04. Methods of measuring the mass fraction of metals and metal oxides in the powder X-ray fluorescence method of soil samples]. Saint Petersburg, 2010, 50 p.
19. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве [GN 2.1.7.2041-06. Maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in the soil]. Moscow, 2006.
20. ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве от 18.05.2009 г. № 32 [GN 2.1.7.2511-09. The approximate permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil from 18.05.2009 № 32]. Available at: consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_887881 / (accessed 20.03.2016).

УДК 332.133.6

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-58-65

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАССЕЛЕНИЯ В ПРИМОРСКОЙ ЗОНЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В 1989–2015 годах\*

© 2016 г. А.Г. Дружинин, С.С. Лачининский, А.И. Краснов, И.С. Сорокин

Дружинин Александр Георгиевич – доктор географических наук, профессор, директор Северо-Кавказского научно-исследовательского института экономических и социальных проблем Южного федерального университета, ул. Пушкинская, 160, г. Ростов-на Дону, 344006, e-mail: alexdru9@gmail.com

Лачининский Станислав Сергеевич – кандидат географических наук, доцент, кафедра экономической и социальной географии, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, e-mail: lachininsky@gmail.com

Краснов Антон Иванович – старший преподаватель, кафедра экономической и социальной географии, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, e-mail: antonkrasnov@rambler.ru

Сорокин Иван Сергеевич – студент, кафедра экономической и социальной географии, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, e-mail: batata2011@mail.ru

Druzhinin Aleksandr Georgievich – Doctor of Geographical Science, Professor, Director of the North Caucasian Research Institution of Economic and Social Problems of the Southern Federal University, Pushkinskaya St., 160, Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: alexdru9@gmail.com

Lachininskii Stanislav Sergeevich – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Department of Economic and Social Geography, St. Petersburg State University, Universitetskaya Emb., 7–9, Saint Petersburg, 199034, Russia, e-mail: lachininsky@gmail.com

Krasnov Anton Ivanovich – Senior Lecturer, Department of Economic and Social Geography, St. Petersburg State University, Universitetskaya Emb., 7–9, Saint Petersburg, 199034, Russia, e-mail: antonkrasnov@rambler.ru

Sorokin Ivan Sergeevich – Student, Department of Economic and Social Geography, St. Petersburg State University, Universitetskaya Emb., 7–9, Saint Petersburg, 199034, Russia, e-mail: batata2011@mail.ru

Рассмотрено и оценено влияние «приморского фактора» на структурирование и трансформацию системы расселения в Ленинградской области. Установлено, что селитебное пространство в приморской зоне «смещено» (и весь постсоветский период продолжает «стягиваться») непосредственно к побережью и его ближайшей периферии. Идентифицированы четыре субпояса приморского расселения: собственно приморский (от 0 до 50 км от моря), пояс ближней периферии приморской зоны (от 50 до 100 км), пояс дистанцированной от моря периферии приморской зоны (от 100 до 150 км) и пояс постпериферии приморской зоны (на расстоянии 150–200 км от берега моря). Выявлены факторы экзистических и демографических различий северного (с более устойчивым, плотным и сбалансированным каркасом расселения и его экономического фундамента) и южного побережья Финского залива; показано, что плотность населения и поселений повсеместно уменьшается по мере удаления не только от морского побережья, но и Санкт-Петербурга, что свидетельствует о существенном, корректирующем действии на расселение фактора метрополитанизации.

**Ключевые слова:** система расселения, поселение, муниципальное образование, приморская зона, талассоаттрактивность, морехозяйственная деятельность, Ленинградская область.

The influence of «coastal factor» on structuring and transformation of system of moving in the Leningrad Region is considered and estimated. It is set that the selitebny space in a seaside zone «is displaced» and all Post-Soviet period continues «to be tightened») directly to the coast and its next periphery four subbelts of seaside moving are identified: actually, seaside (from 0 to 50 km from the sea), a belt of the short-range periphery of a seaside zone (from 50 to 100 km), a belt of the periphery of a seaside zone (from 100 to 150 km) distanced from the sea and a belt of the post-periphery of a seaside zone (at distance of 150-200 km from the seashore). The factors the settler and demographic distinctions northern (with more steady, dense, and balanced framework of moving and its economic base) and the southern coast of the Gulf of Finland are revealed; it is shown that density of population and settlements everywhere decreases in process of removal not only from the sea coast, but also St. Petersburg that demonstrates essential, corrective action on moving of a factor of a metropolization.

**Keywords:** system of moving, settlement, municipality, coastal zone, thalasso attractiveness, sea economic activity, Leningrad Region.

Понятие «талассоаттрактивность» (т.е. «притяжение» к морю населения, производственных мощностей и инфраструктуры) циркулирует в советской (российской) географии с середины 1970-х гг. [1]. Параллельно, в этот же период, появился интерес к проблематике приморского рассе-

\*Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 15-18-10000 «Трансграничное кластерообразование в динамике экономических и селитебных систем приморских территорий европейской России».

ления, его детерминантам, структурной специфике [2]. В 2000-е гг. соответствующий тренд (coastalization) оказался чётко акцентирован и в англоязычной литературе [3]; констатируется, что в 100-километровой полосе Земли проживает 37 % мирового населения, а в 200 км – около 50 %; плотность прибрежного населения при этом в 2,5 раза выше, чем глобальная средняя плотность [4].

Выступая одним из приоритетных факторов территориальной организации общества (что озвучено в многочисленных публикациях как отечественных [5–7], так и зарубежных [8–10] географов), талассоаттрактивность получает своё фактическое воплощение в феномене приморской зоны [11], специфической дискретно-континуальной полосе хозяйственной и селитебной активности. В России (омываемой водами трех океанов и 13 морей, располагающей более 48 тыс. км морских границ) приморская зона протяжённа, масштабна и одновременно на многих своих участках «недоформирована», «размыта», напрямую зависима от локализации и социально-экономической динамики ведущих городов, характеризуема многоаспектными проявлениями *инверсии талассоаттрактивности* [12]. Страна преимущественно «континентальная» (основными массивами своих территорий существенно удалённая от побережий [13]) и традиционно воспринимаемая как «Океан суши», «Континент-Океан» [14], при этом даже в условиях глобализации продолжает пребывать на периферии мирового тренда к расширению «приморской урбанизации». Лишь фрагментарно, на отдельных наиболее геоэкономически значимых и традиционно интенсивно освоенных, привлекательных в социально-экономическом и природно-климатическом отношении сегментах приморской зоны Юга России [15], тихоокеанской России [16], российской Прибалтики [17, 18], ситуация контрастно иная. Ключевое позиционирование в ряду подобных узловых компонент приморской зоны Российской Федерации (характеризуемых не только полномасштабным проявлением талассоаттрактивности, но и многообразием продуцирующих её факторов и эффектов) занимает побережье восточной части Финского залива, административно относящееся как к Ленинградской области, так и к г. Санкт-Петербургу, формирующему собственное, в существенной мере выходящее за пределы административных границ, агломерационное пространство [19], существенно корректирующее конфигурацию приморской зоны, видоизменяющее всю архитектуру её расселения.

### Структурные составляющие приморской зоны Ленинградской области: экитическая и демографическая специфика

Отечественные географы-обществоведы по-разному делимитируют приморскую зону [20]. Например, С.С. Сальников исходил из расстояния 80 км от берега [1], иные авторы ориентировались на рубежную дистанцию в пределах 50–200 км [5, 13]. При этом справедливо отмечается [21], что границы приморских зон могут выступать в трех инвариантах: линейно-геометрические, административно-юридические и естественно-экологические. Показатель удаленности от берега в этой связи является столь же важным, сколь и соотносительным, а сама конфигурация приморской зоны во многом предопределяется структурой и уровнем развития конкретных компонент морехозяйственного комплекса, орографией и гидрографией побережья, конфигурацией транспортной сети и рядом иных факторов [12].

В ситуации Ленинградской области (одного из фокусов морехозяйственной активности России [4]) приморская зона может быть идентифицирована в своей предельной (до 200 км) ширине; при этом учёт селитебной и демографической специфики (в свою очередь предопределяемой фактическим и потенциальным влиянием «фактора моря») позволяет структурировать её на четыре «размытых», но тем не менее чётко прослеживаемых пояса: собственно приморский (от 0 до 50 км), пояс ближней периферии приморской зоны (от 50 до 100 км), пояс дистанцированной от моря периферии (от 100 до 150 км) и пояс постпериферии приморской зоны (от 150 до 200 км). Отметим, что два последние отличаются лишь локальными проявлениями талассоаттрактивности и во многом экитически контрастны предшествующим поясам, формируя с ними единое селитебное пространство.

Характерно, что в собственно приморском поясе располагаются 111 поселений Ленинградской области (всего их 184), концентрирующих подавляющую часть 67,9 % населения региона; при этом 15 поселений, непосредственно выходящих к морю, вмещают 214,6 тыс. чел. (табл. 1). Численность населения этого структурного компонента приморской зоны за 1989–2015 гг. выросла на 178,1 тыс. чел. (или на 18,4 %), а людность среднестатистического поселения увеличилась до 10,3 тыс. чел. Здесь же локализованы основные города: Гатчина (96,3 тыс. жителей), Выборг (79,9 тыс.), Сосновый Бор (67,4 тыс.), Кингисепп (48,0 тыс.), Тосно (45,3 тыс.) и др.

Таблица 1

**Динамика численности населения в приморской зоне Ленинградской области  
(рассчитано по [22–25])**

Пояс	Всего поселений	Численность населения, чел.				2015 к 1989 г., %
		1989	2002	2010	2015	
I пояс приморской зоны (0–50 км)*	111	969099 63,9 %	1017901 65,0 %	1081003 66,8 %	1147214 67,9 %	+18,4
в т.ч. непосредственно выходящие к морю	15	195877	208067	210122	214639	+9,6
II пояс приморской зоны (50–100 км)	30	180181 11,9 %	204320 13,0 %	214277 13,2 %	225596 13,3 %	+25,2
III пояс приморской зоны (100–150 км)	31	253006 16,7 %	237233 15,2 %	227506 14,0 %	223155 13,2 %	–11,8
IV пояс приморской зоны (150–200 км)	12	114793 7,6 %	105393 6,7 %	95380 5,9 %	94344 5,6 %	–17,8
Всего по приморской зоне	184	1517079 100 %	1564847 100 %	1618166 100 %	1690309 100 %	+11,4

\* – от береговой линии.

В поясе ближней периферии находятся 30 поселений, проживает 13,3 % Ленинградской области, и именно эта группировка в постсоветский период продемонстрировала наиболее высокую динамику демографического роста (25,2 %). На третий (100–150 км) и на четвёртый (150–200 км) пояса приходится всего 13,2 и 5,6 % населения соответственно. Для оконтуриваемых ими поселений характерно сокращение численности населения.

В итоге (как свидетельствует авторская аналитика) всё селитебное пространство приморской зоне «смещено» (и далее продолжает «притягивать-

ся») непосредственно к побережью и его ближайшей периферии. Симптоматично, что 96 из 184 поселений за рассматриваемый период продемонстрировали положительную динамику (табл. 2). При этом в первом поясе прибрежной зоны таковых – 67 %, во втором – 53, в третьем – 16, а в четвертом поясе – 17 %. «Фактор моря» здесь просматривается достаточно чётко; тем не менее он не основной; основополагающим обстоятельством выступает метрополизация, возрастающее социально-экономическое влияние доминирующего урбанистического центра [26].

Таблица 2

**Распределение поселений Ленинградской области по динамике численности населения, ед.\***

Пояс, км	Динамика численности населения в 1989–2015 гг., %					Всего
	до 100	100–140	140–180	180–220	более 220	
	Влияние приморского фактора					
0–50	36	60	6	2	7	111
50–100	14	12	3	1	0	30
100–150	26	5	0	0	0	31
150–200	10	2	0	0	0	12

\* – составлено авторами.

**Поляризация и асимметрия приморского расселения Ленинградской области: основные факторы, проявления, перспективы**

Исторически под влиянием природно-географических и социально-экономических факторов в Ленинградской области сформировались три основных

ареала «притяжения» населения: Санкт-Петербург, собственно побережье Финского залива, а также территории Карельского перешейка. В последнюю четверть века их доминирование в системе расселения не только сохранилось, но и усилилось. Проведённое исследование [20] высвечивает при этом общую тенденцию к уменьшению плотности населения при уда-

лении от берега. Все исключения связаны лишь с крупными районными центрами. В целом же при удалении на 100 км от побережья плотность населе-

ния чаще всего уже не превышает 10 человек на квадратный километр, а в некоторых случаях это характерно и для меньших расстояний (табл. 3).

Таблица 3

**Изменение градиентов плотности населения в Ленинградской области с удалением от побережья, чел/км<sup>2</sup>\***

Удаление, км	УЛ	СБ	БИ	Б	Л	МП СПб	ПП СПб	П	В	БП
0	8	936	168	1044	1044	12642	21470	23	30	6
25	6	8	30	125	5867	420	347	22	11	6
50	2	22	47	92	2490	116	99	13	7	7
75	4	4	21	16	15	12	3	6	6	49
100	–	3	5	2	12	5	5	9	457	7
125	–	2	161	–	6	6	16	–	–	–
150	–	–	15	–	2	2	4	–	–	–
175	–	–	–	–	1,5	2	5	–	–	–
200	–	–	–	–	2	5	2	–	–	–

\* – составлено авторами. УЛ – Усть-Луга (центр сельского поселения); СБ – Сосновый Бор (городское поселение); БИ – Большая Ижора (поселок городского типа); Б – Бронка (железнодорожная станция); Л – Ломоносов (районный центр Ленинградской области); МП СПб – морской порт Санкт-Петербург; ПП СПб – пассажирский порт Санкт-Петербург; П – Приморск (центр городского поселения); В – Высоцк (городское поселение), БП – бухта Припортовая.

Иной градиент плотности населения предопределён дистанцией от Санкт-Петербурга. Если рассматривать южный сегмент Финского залива, в муниципальном образовании Морские Ворота плотность

достигает 12,6 тыс. чел. на 1 кв. км, в Сосновой Поляне – 5,6 тыс., в г. Ломоносове – 1 тыс. чел, в пгт Большая Ижора – 168 чел., а в Усть-Лужском сельском поселении – всего 8 чел. на 1 кв. км (рис. 1).

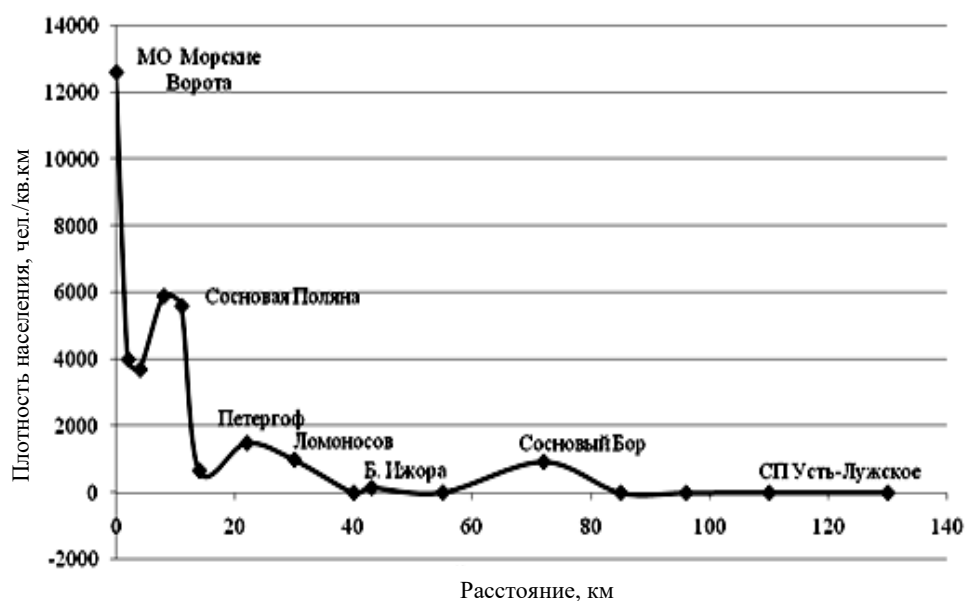


Рис. 1. Изменение градиента плотности населения для приморской зоны Финского залива (юг) (составлено авторами)

Аналогичная ситуация характерна и для северного сегмента приморской зоны, причём здесь градиент в плотности населения проявляется ещё в большей степени. Так, в муниципальном округе № 65 плотность населения составляет 11,3 тыс. чел.

на 1 кв. км, в посёлке Лисий Нос – уже 567 чел., в г. Сестрорецке – 429 чел., в г. Зеленогорске – 363 чел., Полянском сельском поселении – 22 чел., Приморском городском поселении – 23 чел. на 1 кв. км (рис. 2).

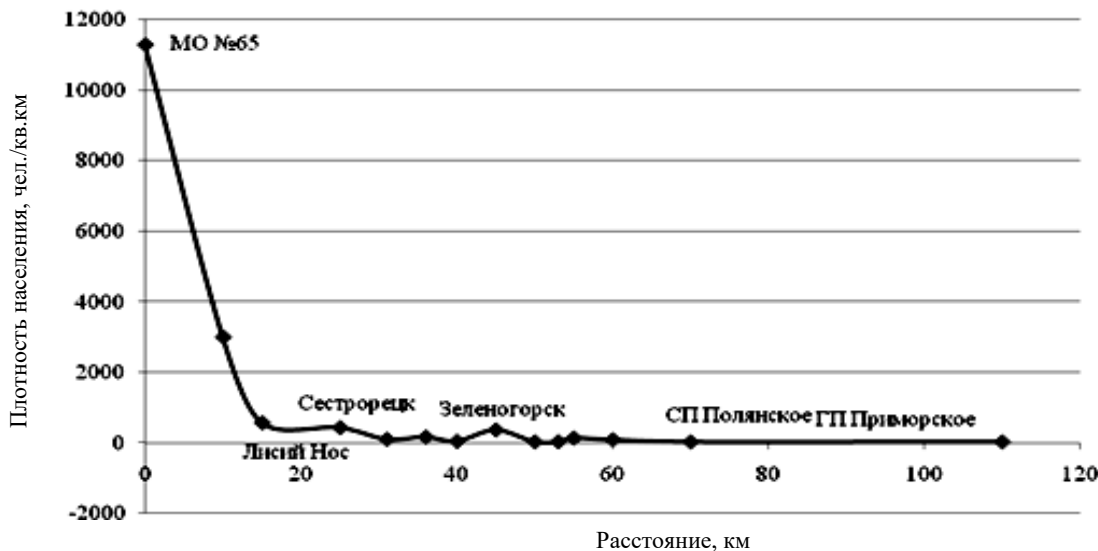


Рис. 2. Изменение градиента плотности населения для приморской зоны Финского залива (север) (составлено авторами)

Устойчивость, самодостаточность и сбалансированность каркаса расселения и его экономического фундамента на северном берегу Финского залива при этом намного выше, чем на южном,

что полномасштабно проявилось в последнюю четверть века перетоком населения в северные, приморские пригороды Санкт-Петербурга (рис. 3).



Рис. 3. Динамика численности населения Ленинградской области в разрезе муниципальных образований (составлено авторами)



В южном сегменте приморской зоны незначительным положительным приростом населения отличаются лишь территории, прилегающие к наиболее экономически успешному городу Ленинградской области – атомграду Сосновый Бор (Копорское и Нежновское сельские поселения) и наиболее амбициозному проекту строительства МПК «Усть-Луга» (Усть-Лужское и Куземкинское сельские поселения). Также некоторые муниципальные образования Ломоносовского района (Пениковское и Низинское сельские поселения) демонстрируют объективную положительную динамику в силу своей непосредственной близости к Санкт-Петербургу, наличия КАД.

Констатируя выраженные различия в характере и динамике расселения на северном и южном побережьях Финского залива, уместно полагать, что в долгосрочной перспективе ранее возникшая асимметрия постепенно будет сглаживаться за счёт опережающего социально-экономического роста в приморской зоне юго-запада Ленинградской области. Уже с середины 1990-х гг. на южном берегу активизировалась морехозяйственная деятельность. В частности, в 1994 г. построен прибрежный склад нефтепродуктов ЗАО «Несте Санкт-Петербург» в г. Ломоносове. В 2009 г. в рамках Концепции развития перспективных районов (аванпортов) Большого порта Санкт-Петербург, порт Бронка выделен как наиболее перспективный и начинается строительство ММПК «Бронка» (уже к 2017 г. планируется увеличение производственной мощности контейнерного терминала до 1,9 млн TEU). В Лужской губе Финского залива ведется строительство многоцелевого и универсального морского торгового порта Усть-Луга пропускной способностью до 170 млн т различных грузов в год (к 2018 г.). Наиболее же масштабным, системообразующим проектом развития инфраструктуры всей приморской зоны Финского залива стал комплекс защитных сооружений (КЗС), возведение которого завершилось в 2011 г. Строительство и запуск КЗС позволили ввести в эксплуатацию кольцевую автомобильную дорогу вокруг г. Санкт-Петербурга (А118, строительство начато в 1998 г.), интегрировавшую разрозненные сегменты приморской зоны в единое селитебное и экономическое целое. Следующим этапом развития всей Санкт-Петербургской агломерации и ее транспортной системы станет строительство КАД-2 (предположительно до 2020 г.). Уже сейчас на южных участках КАД – от Московского шоссе и практически до Бронки, а также в районе Мурманского шоссе – проезжают 200 тысяч автомобилей в сутки, что превышает нормативные значения объекта. Это, полагаем, придаст дополнительный импульс социально-экономической динамике в удаленных от по-

бережья поясах приморской зоны, усилит общие проявления талассоаттрактивности на территории Ленинградской области.

### Заключение

Ленинградская область – один из немногих регионов России с пролонгированным и масштабным влиянием на систему расселения «морского фактора». В последнюю четверть века исторически присущие региону проявления талассоаттрактивности обрели новый импульс, способствуя как развитию, расширению приморской зоны, так и её структурированию, расслоению на отдельные сегменты со специфической социально-экономической, демографической и экзистической динамикой. Тенденции концентрации и поляризации (её ядрами выступают Санкт-Петербург и его ближайшая периферия, а также приморские поселения в сфере влияния крупных экономических, главным образом транспортно-логистических, проектов) при этом в целом сохраняют доминирование. Роль побережья Финского залива и для Ленинградской области, и для России в целом в этом контексте стратегически будет только усиливаться, превращая приморскую зону во всё более значимый, приоритетный объект общественно-географического анализа и территориального управления.

### Литература

1. Сальников С.С. Экономическая география океана – новое перспективное направление экономической и социальной географии // Советская география. Л., 1984. С. 231–242.
2. Покишиевский В.В. Теоретические аспекты притяжения расселения к морским побережьям и опыт количественной оценки этого притяжения // Изв. ВГО. 1975. Т. 107, № 1. С. 87–96.
3. Serra P., Vera A., Tull A.F., Salvati L. Beyond urban-rural dichotomy: Exploring socioeconomic and land-use processes of change in Spain (1991–2011) // Applied Geography. 2014. № 55. P. 87–95.
4. Социально-экономическое развитие приморских территорий Европейской части России: факторы, тренды, модели / под ред. А.Г. Дружинина. Ростов н/Д., 2016. 236 с.
5. Слевич С.Б. Океан: ресурсы и хозяйство. Л., 1988. 315 с.
6. Залогин Б.С. Экономическая география Мирового океана. М., 1984.
7. Лавров С.Б. Портово-промышленные комплексы в проблеме взаимоотношений общества и природной среды в океане и региональное развитие приморских районов // Вопросы географии океана. Л., 1983. С. 25–31.
8. Small C., Nicholls R.J. A global analysis of human settlement in coastal zones // J. of Coastal Research. 2003. Vol. 19 (3). P. 584–599.
9. Green D.R. Issues in coastal zone management. UK, 2009. 237 p.

10. Ali Pak, Farhad Majd Integrated coastal management plan in free trade zones, a case study // *Ocean and Coastal Management*. 2011. № 54. P. 129–136.
11. Бондаренко В.С. Экономико-географическое изучение приморских зон // *Вестн. МГУ. География*. 1981. № 1. С. 36–41.
12. Дружинин А.Г. Приморская зона России как общественно-географический феномен: подходы к концептуализации и делимитации // *Балтийский регион*. 2016. Т. 8, № 2. С. 85–100.
13. Безруков Л.А. Континентально-океаническая дихотомия в международном и региональном развитии. Новосибирск, 2008. 369 с.
14. Ильин И.А. О России. Три речи. 1926–1933. София, 1934. 78 с.
15. Дружинин А.Г., Дайкер А.О., Сухинин С.А. «Приморский фактор» в локализации населения Юга России: подходы к идентификации // *Научная мысль Кавказа*. 2015. № 3. С. 74–81.
16. Тихоокеанская Россия: страницы прошлого, настоящего, будущего / отв. ред. П.Я. Бакланов. Владивосток, 2008. 216 с.
17. Дружинин А.Г., Лачининский С.С. «Приморский фактор» в социально-экономическом развитии территории (на материалах Кингисеппского района Ленинградской области) // *Янтарный мост*. 2015. № 3 (6). С. 22–41.
18. Фёдоров Г.М., Корнеевец В.С. Социально-экономическая типологизация приморских регионов России // *Балтийский регион*. 2015. № 4. С. 121–134.
19. Лачининский С.С., Лачининский А.С., Семенова И.В. Геоэкономический фактор в формировании пространственной структуры Санкт-Петербургского приморского региона // *Изв. РГО*. 2016. Т. 148, № 2. С. 52–67.
20. Лачининский С.С., Семенова И.В. Санкт-Петербургский приморский регион: геоэкономическая трансформация территории. СПб., 2015. 191 с.
21. Humphrey S., Burbridge P. Planning and management processes sectoral and territorial cooperation. Thematic study D // *European Demonstration Programme on Integrated Coastal Zone Management*. 1999. URL: <http://www.ec.europa.eu/environment/iczm/home.htm> (дата обращения: 10.02.2016).
22. Население СССР: По данным Всесоюзной переписи населения 1989 г. М., 1990. 45 с.
23. Официальный сайт Всероссийской переписи населения 2002 г. URL: <http://www.perepis2002.ru> (дата обращения: 10.02.2016).
24. Об итогах Всероссийской переписи населения 2010 г.
25. Об итогах Всероссийской переписи населения 2015 г.
26. Дружинин А.Г. Метрополии и метрополизация в современной России: концептуальные подходы в политико-географическом контексте // *Изв. РАН. География*. 2014. № 1. С. 19–27.
- otsenki etogo prityazheniya [Theoretical aspects of gravity settling to the sea coast and experience quantify this attraction]. *Izv. VGO*, 1975, vol. 107, no 1, pp. 87-96.
3. Serra P., Vera A., Tull A.F., Salvati L. Beyond urban-rural dichotomy: Exploring socioeconomic and land-use processes of change in Spain (1991-2011). *Applied Geography*, 2014, no 55, pp. 87-95.
4. *Sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie primorskikh territorii Evropeiskoi chasti Rossii: faktory, trendy, modeli* [Socio-economic development of coastal areas of the European part of Russia: factors, trends, models]. Ed. A.G. Druzhinin. Rostov-on-Don, 2016, 236 p.
5. Slevich S.B. *Okean: resursy i khozyaistvo* [Ocean: resources and agriculture]. Leningrad, 1988, 315 p.
6. Zalugin B.S. *Ekonomicheskaya geografiya Mirovogo okeana* [The economic geography of the world's oceans]. Moscow, 1984.
7. Lavrov S.B. [Port-industrial complexes in the problem of relations between society and the natural environment in the ocean and regional development of coastal areas]. *Voprosy geografii okeana*. Leningrad, 1983, pp. 25-31.
8. Small C., Nicholls R.J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. of Coastal Research*, 2003, vol. 19 (3), pp. 584-599.
9. Green D.R. *Issues in coastal zone management*. UK, 2009, 237 p.
10. Ali Pak, Farhad Majd. Integrated coastal management plan in free trade zones, a case study. *Ocean and Coastal Management*, 2011, no 54, pp. 129-136.
11. Bondarenko V.S. Ekonomiko-geograficheskoe izuchenie primorskikh zon [Economic-geographical study of coastal areas]. *Vestn. MGU. Geografiya*, 1981, no 1, pp. 36-41.
12. Druzhinin A.G. Primorskaya zona Rossii kak obshchestvenno-geograficheskii fenomen: podkhody k kontseptualizatsii i delimitatsii [Maritime zone as a socio-geographical phenomenon: the approaches to the conceptualization and delimitation]. *Baltiiskii region*, 2016, vol. 8, no 2, pp. 85-100.
13. Bezrukov L.A. *Kontinental'no-okeanicheskaya dikhotomiya v mezhdunarodnom i regional'nom razviti* [Continental-oceanic dichotomy in the international and regional development]. Novosibirsk, 2008, 369 p.
14. Il'in I.A. *O Rossii. Tri rechi. 1926–1933* [About Russia. Three speech. 1926-1933]. Sofia, 1934, 78 p.
15. Druzhinin A.G., Daiker A.O., Sukhinin S.A. “Primorskii faktor” v lokalizatsii naseleniya Yuga Rossii: podkhody k identifikatsii [“Seaside factor” in the localization of the population of Southern Russia: approaches to identify]. *Nauchnaya mysl' Kavkaza*, 2015, no 3, pp. 74-81.
16. *Tikhookeanskaya Rossiya: stranitsy proshlogo, nastoyashchego, budushchego* [Pacific Russia: the last page of the present, the future]. Ed. P.Ya. Baklanov. Vladivostok, 2008, 216 p.
17. Druzhinin A.G., Lachininskii S.S. “Primorskii faktor” v sotsial'no-ekonomicheskom razviti territorii (na materialakh Kingiseppskogo raiona Leningradskoi oblasti) [“Seaside factor” in social and economic development of the territory (on the materials of the Kingisepp District of Leningrad Region)]. *Yantarnyi most*, 2015, no 3 (6), pp. 22-41.
18. Fedorov G.M., Korneevets V.S. *Sotsial'no-ekonomicheskaya tipologizatsiya primorskikh regionov Rossii* [Socio-economic typology of the coastal regions of Russia]. *Baltiiskii region*, 2015, no 4, pp. 121-134.

## References

1. Sal'nikov S.S. Ekonomicheskaya geografiya okeana - novoe perspektivnoe napravlenie ekonomicheskoi i sotsial'noi geografii [The economic geography of the ocean - a new perspective direction of economic and social geography]. *Sovetskaya geografiya* [Soviet geography]. Leningrad, 1984, pp. 231-242.
2. Pokshishevskii V.V. Teoreticheskie aspekty prityazheniya rasseleniya k morskim poberezh'yam i opyt kolichestvennoi

19. Lachininskii S.S., Lachininskii A.S., Semenova I.V. Geo-ekonomicheskii faktor v formirovanii prostranstvennoi struktury Sankt-Peterburgskogo primorskogo regiona [Geo-economic factor in the formation of the spatial structure of the St. Petersburg seaside region]. *Izv. RGO*, 2016, vol. 148, no 2, pp. 52-67.
20. Lachininskii S.S., Semenova I.V. *Sankt-Peterburgskii primorskii region: geoeconomicheskaya transformatsiya territorii* [St. Petersburg seaside region: geo-economic transformation of the territory]. Saint Petersburg, 2015, 191 p.
21. Humphrey S., Burbridge P. Planning and management processes sectoral and territorial cooperation. Thematic study D. *European Demonstration Programme on Integrated Coastal Zone Management*. 1999. Available at: <http://www.ec.europa.eu/environment/iczm/home.htm> (accessed 10.02.2016).
22. *Naselenie SSSR: Po dannym Vsesoyuznoi perepisi naseleniya 1989 g.* [USSR Population: According to the All-Union census of 1989]. Moscow, 1990, 45 p.
23. *Ofitsial'nyi sait Vserossiiskoi perepisi naseleniya 2002 g.* [Official site of the All-Russian population census of 2002]. Available at: <http://www.perepis2002.ru> (accessed 10.02.2016).
24. *Ob itogakh Vserossiiskoi perepisi naseleniya 2010 g.* [On the results of the National Population Census 2010].
25. *Ob itogakh Vserossiiskoi perepisi naseleniya 2015 g.* [On the results of the National Population Census 2015].
26. Druzhinin A.G. Metropolii i metropolizatsiya v sovremennoi Rossii: kontseptual'nye podkhody v politiko-geograficheskom kontekste [Metropolis and metropolization in modern Russia: conceptual approaches to political and geographical context]. *Izv. RAN. Geografiya*, 2014, no 1, pp. 19-27.

---

*Поступила в редакцию*

*29 июня 2016 г.*

УДК 504.064.36:574

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-66-71

## ТЕХНОГЕННЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОТОКИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ (НА ПРИМЕРЕ ДОНЕЦКОГО БАССЕЙНА)\*

© 2016 г. В.Е. Закруткин, Е.В. Гибков

Закруткин Владимир Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: vezak@list.ru

Zakrutkin Vladimir Evgen'evich – Doctor of Geological and Mineralogical Science, Head of the Department of Geocology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vezak@list.ru

Гибков Евгений Викторович – кандидат географических наук, старший преподаватель, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: irvict@mail.ru

Gibkov Evgenii Viktorovich – Candidate of Geographical Science, Senior Lecturer, Department of Geocology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irvict@mail.ru

Представлены результаты исследования техногенных геохимических потоков в Донецком бассейне. Установлены масштабы влияния первичных и вторичных техногенных потоков на компоненты окружающей среды – атмосферный воздух, почвенный покров, поверхностные и подземные воды. Рекомендуется для уменьшения негативных последствий при формировании экологической обстановки в пределах углепромышленных территорий разработать специализированную систему управления указанными потоками.

**Ключевые слова:** геохимические потоки, породные отвалы, Донбасс, химический состав воды, уровень загрязнения, техногенные шахтные воды.

Results of research of technogenic geochemical streams in the Donetsk Basin are presented in article. Scales influence of primary and secondary technogenic streams on environment components – air, soils, the surface and underground water are established. It is recommended to reduce the negative effects of the formation of the environmental situation within the coal-mining territories to develop a specialized specified traffic management system.

**Keywords:** geochemical streams, coal dumps, Donbass, chemical composition, pollution level, technogenic mine water.

Углепромышленные территории традиционно относятся к наиболее проблемным в экологическом отношении регионам. Природные комплексы в их пределах на протяжении длительного времени подвергаются интенсивному техногенному воздействию, следствием которого является широкомасштабное загрязнение компонентов окружающей среды. Основную роль в этих негативных процессах, как показывают исследования, играют техногенные геохимические потоки, формирующиеся как на стадии эксплуатации угольных месторождений, так и вследствие ликвидации нерентабельных шахт.

Одна из первых попыток типизации техногенных геохимических (ТГ) потоков в пределах угледобывающих районов была предпринята Н.П. Солнцевой и Е.М. Никифоровой [1] в связи с необходимостью комплексного изучения геохимических особенностей природных объектов (почв, поверхностных и подземных вод, растительности, ландшафтов в целом), находящихся в сфере влияния отвалов вскрышных пород.

Этими авторами по аналогии с принятыми при геохимических поисках полезных ископаемых оп-

ределениями и с учетом характера (фазы) поступления вещества в природную среду были выделены: а) литохимические потоки – поступление веществ в твердой фазе; б) гидрохимические потоки – поступление веществ в жидкой фазе; в) атмосферические потоки – поступление веществ в газообразном виде. Дальнейшая типизация ТГ-потоков осуществлялась в зависимости от этапа трансформации территории угледобычи. Здесь, прежде всего, выделены первичные ТГ-потоки загрязнителей, образующиеся в процессе эксплуатации угольного месторождения и соответствующие техническому этапу. К ним относятся (при закрытом способе добычи) вскрышные и вмещающие породы, представляющие первичные ТГ литохимические потоки, шахтные воды – первичные ТГ гидрохимические потоки; дымы, пыль, аэрозоли от технических объектов (энергоотопительных систем, обогатительных и коксохимических предприятий) – первичные ТГ атмосферические потоки.

В местах аккумуляции этих потоков формируются первичные ореолы загрязнения. Важно подчеркнуть, что в качестве основного вида таких тех-

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00376).

ногенных ореолов рассматриваются все виды отвалов вскрышных пород, которые, в свою очередь, являются причиной и источником формирования вторичных ТГ-потоков загрязнителей: атмо-, лито- и гидрохимических.

Данная статья посвящена характеристике техногенных геохимических потоков в пределах Донецкого каменноугольного бассейна – одного из крупнейших в Европе. Он расположен на территории Ростовской области Российской Федерации, Луганской и Донецкой областей Украины. Его эксплуатация осуществляется на протяжении более двухсот лет, что привело к извлечению на поверхность больших объемов вскрышных и вмещающих пород. В настоящее время в Донецком бассейне сформировалось более 1500 отвалов, в которых сосредоточено порядка 1400 млн м<sup>3</sup> породного материала [2, 3]. Эти отвалы занимают более 12 тыс. га наиболее плодородных почв мира – черноземов и представляют собой, как отмечалось выше, пер-

вичные техногенные ореолы. В литологическом отношении отвалы представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, углем и другими породами. Обломки отвальных пород неоднородны по гранулометрическому составу, имеют размер от глинистых частиц до глыб. Они складываются в основном в виде терриконов высотой до 80 м. Их геохимическая специфика обусловлена рядом факторов. В первую очередь она определяется региональными особенностями угленосной провинции (ее структурно-тектонической позицией, возрастом угленосной толщи, палеогеографическими условиями угленакопления и др.). Это хорошо видно на рис. 1, где демонстрируются существенные различия в геохимических спектрах микроэлементов вскрышных пород Донецкого и Кизеловского (Пермская область РФ) угольных бассейнов. Эти различия проявляются, прежде всего, в относительной обогащенности большинством элементов отвальных пород Донбасса.

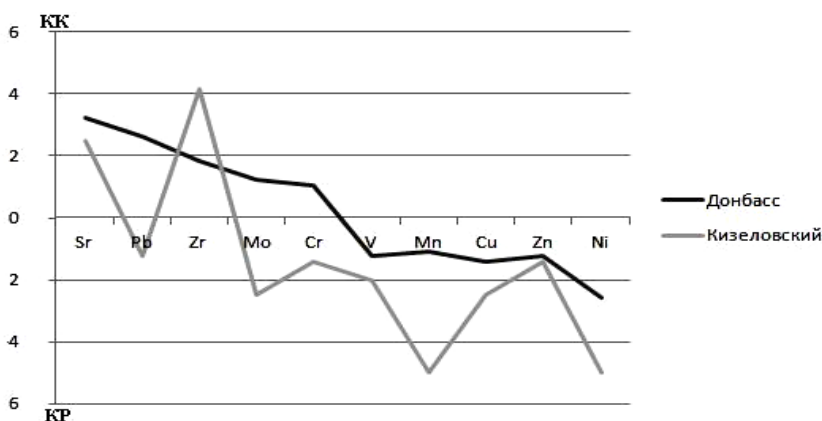


Рис. 1. Геохимические спектры отвальных пород Донецкого и Кизеловского угольных бассейнов (по данным [1, 4])

Неоднородность химического состава породных отвалов обнаруживается и внутри бассейнов при сравнении, например, отдельных его сегментов (Восточно-

го и Западного), а также в пределах сегментов при сопоставлении геохимических спектров отвальных пород различных углепромышленных районов (рис. 2).

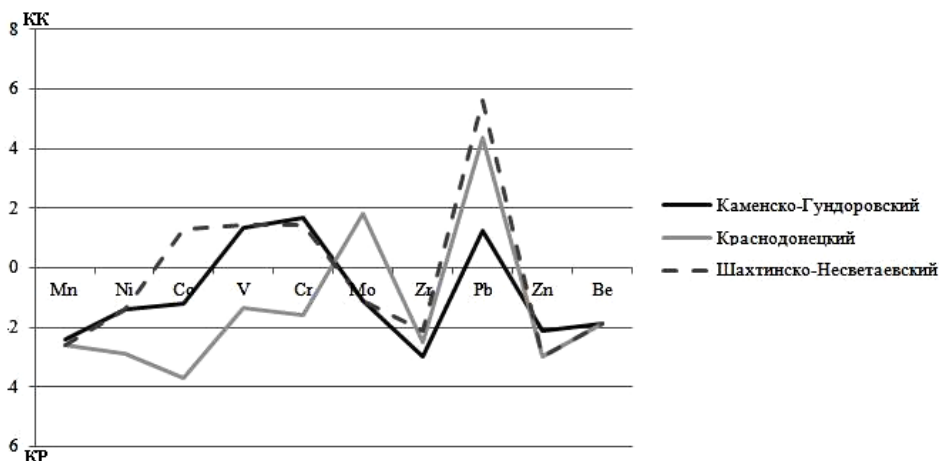


Рис. 2. Геохимические спектры отвальных пород углепромышленных районов Восточного Донбасса

И в том, и в другом случае геохимические особенности первичных литохимических ореолов будут зависеть от их возраста (длительности гипергенного этапа трансформации), состояния (негорелые, горелые и перегоревшие), количественных соотношений в них обломков пород различного литологического состава.

На рис. 3 демонстрируется сравнительная оценка геохимических спектров пород, из обломков ко-

торых в основном состоят эти отвалы. Как и следовало ожидать, большинство из рассматриваемых элементов проявляет склонность к накоплению в аргиллитах и алевролитах, особенно в их пиритизированных разностях. Таким образом, надо полагать, что чем большую роль в составе отвалов будут играть отмеченные разности пород, тем контрастнее будут выглядеть первичные литохимические ореолы.

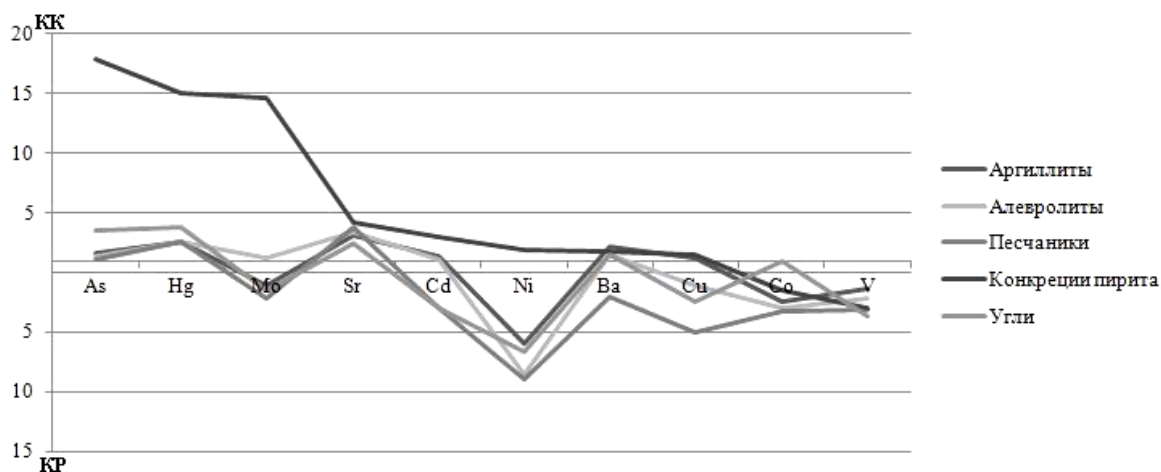


Рис. 3. Геохимические спектры отдельных литотипов Донецкого бассейна [4]

Породные отвалы угледобывающих районов неустойчивы в условиях земной поверхности. Они подвергаются, прежде всего, физическому и химическому выветриванию (окислению, гидролизу, гидратации, метасоматозу), что способствует изменению их химического состава. Среди химических процессов, протекающих в породных отвалах, особую роль играют процессы окисления сульфидов металлов, в основном пирита – неперменного компонента угленосных отложений. Реакции окисления протекают с выделением тепла и нередко сопровождаются самовозгоранием отвалов, обжигом, переплавлением минералов, фумарольными процессами. Гипергенная переработка и горение отвалов продолжаются на протяжении многих лет. В результате формируются трансформированные литохимические ореолы. Трансформация породных отвалов сопровождается образованием вторичных геохимических потоков – атмо-, гидро-, литогеохимических.

Поступление загрязняющих веществ в атмосферу происходит в результате ветровой эрозии и самовозгорания терриконов. Так, по имеющимся оценкам, в процессе дефляции за год с одного терриконика в пределах Донецкого бассейна в атмосферу поступает свыше 0,7 т пыли, которая, оседая, загрязняет 2,5 га сельскохозяйственных земель. А один интенсивно горящий отвал является источни-

ком выделения в атмосферный воздух от 5 до 25 т в год опасных для здоровья населения загрязняющих веществ – главным образом оксида углерода, диоксида серы, сероводорода и оксидов азота.

Газовые выделения из горящих угольных отвалов являются контрастными по своему химическому составу, что связано с длительностью процессов горения. У длительно горящих (высокотемпературных) терриконов типоморфными элементами выбросов в атмосферу являются S, Ti, Ag, Cd, Al, P, у «молодых» (низкотемпературных) – K, Cr, Co, As [5].

В процессе посттехногенной трансформации пород отвалов в результате окисления и сернокислого гидролиза образуются вторичные гидрохимические потоки, содержащие большое количество геохимически активных соединений. Состав водорастворимых солей, мигрирующих с этими потоками, – преимущественно сульфатный. Причем абсолютное количество  $SO_4$  напрямую связано с состоянием терриконов: максимальное содержание анионов данного типа наблюдается в негорящих отвалах, минимальное – в уже перегоревших. Из катионов преобладают Na и Mg, соотношение которых также подвержено существенным колебаниям. Особого внимания заслуживают соединения Fe, содержание которых во вторичных гидрохимических потоках может достигать  $5400 \text{ мг/дм}^3$  (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав вторичных гидрохимических потоков Донецкого бассейна**

Тип породного отвала	РН, ед. Н	Na+K, мг/дм <sup>3</sup>	Ca, мг/дм <sup>3</sup>	Mg, мг/дм <sup>3</sup>	Cl, мг/дм <sup>3</sup>	SO <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Fe <sub>общ.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Fe закис., мг/дм <sup>3</sup>	Сух. ост., мг/дм <sup>3</sup>
Негорящий (водоток № 1 из-под пор. отв. в п. Сидорово-Кадамовском)	3,14	15444	721	4815	253	50046	5400	3715	72325
Негорящий (выход воды № 1 из-под породного отвала ш. № 26)	2,96	4694	2605	5715	69	37720	2530	2160	52228
Перегоревший (выход воды из-под породного отвала шх. № 143)	4,12	224	120	112	49	982	0,06	0,03	1564
Горящий (выход воды № 1 из-под породного отвала шурфа № 5)	3,06	4209	521	4013	456	24551	12,8	4,8	35708

Сернокислые миграционные потоки с породных отвалов при контакте с зональным типом почв, представленным черноземами обыкновенными, с нейтральной или слабощелочной реакцией среды формируют щелочные геохимические барьеры [3]. При этом часть элементов, мигрирующих в виде простых катионов (Zn, Cu, Pb, Cd, Li, Sr), осаждаются в форме слаборастворимых гидроокислов. Группа элементов, находящаяся в сернокислом потоке в гидролизированных соединениях (Al, W, Be, Mo, Zr), осаждаются в почвах в виде простых ионов. В дальнейшем большая часть химических элементов поглощается почвой и концентрируется в гумусовом горизонте, формируя локальные зоны загрязнения, и только некоторая часть (Ag, Bi, Mo, Nb, W) рассеивается вниз по почвенному профилю.

Отвалы вскрышных пород являются источником не только водорастворимых соединений, но и коллоидных, а также большого количества механических взвесей, формирующих вторичные литохимические потоки. В основной своей массе этот материал переносится от отвалов поверхностными стоками. Вещества, поступающие в результате водной миграции, образуют специфические наносы на поверхности почв – «техногенный делювий», мощность которого меняется от нескольких сантиметров до полуметра. По микроэлементному составу образования данного типа на территории Донбасса занимают промежуточное положение между отвалами пород и почвами, находящимися за пределами выноса «техногенного делювия» (табл. 2).

Таблица 2

**Микроэлементный состав отвальных пород, материала «техногенного делювия» и почв Донецкого Бассейна [3]**

Объекты изучения	Cu	Pb	V	Mn	Ni	Mo	Zr	Sr	Cr	Zn
Отвальная порода	20	10	70	1000	30	3	300	10	100	30
Почва (шлейф выноса) – «техногенный делювий»	20	20	100	700	50	5	300	20	100	70
Почва (контроль)	30	30	100	700	50	5	300	10	100	100

Как известно, шахтные воды угольных бассейнов, представляющие собой первичные гидрохимические потоки, формируются за счет подземных вод, дренирующих горные выработки. Дополнительным источником может служить инфильтрация в выработанное пространство атмосферных осадков и поверхностных вод из прилегающих водных объектов, что особенно характерно для Донбасса, где трещиноватые горные породы пользуются широким распространением.

По своему составу шахтные воды сильно отличаются от исходных подземных вод по общей минерализации и содержанию большинства макро- и

микрокомпонентов. В частности, в углепромышленных районах Восточного Донбасса их минерализация изменяется в пределах 1,3–4,5 г/л, а в отдельных случаях достигает 10–12 г/л. По химическому составу это преимущественно воды сульфатного класса натриевой группы.

Следует отметить, что химический состав шахтных вод непостоянен и заметно изменяется со временем. Так, по некоторым данным [6], за 5 лет эксплуатации угольных месторождений минерализация вод в отдельных шахтах Восточного Донбасса увеличилась на 9–13 %. При этом класс воды сменился с гидрокарбонатного на сульфатный,

а местами – на хлоридный. В катионном составе отмечен рост содержания натрия.

Однако наиболее существенные изменения в химическом составе шахтных вод произошли в последние 20–25 лет в связи с реструктуризацией угольной промышленности, предусматривающей ликвидацию нерентабельных шахт путем их затопления. Как показали наши расчеты, минерализация шахтных вод за этот период возросла в среднем на 55 %, а количество отдельных макрокомпонентов (сульфатов, Mg и Ca) увеличилось на 100–150 %. Аналогичные изменения произошли и в микрокомпонентном составе шахтных вод. В частности, содержание железа и марганца в водах ликвидиру-

ванных шахт оказалось в десятки раз выше, чем в водах периода их эксплуатации. Вместе с тем состав компонентов-загрязнителей техногенных шахтных вод в значительной степени соответствует набору типоморфных элементов в подземных и речных водах данного региона. Это свидетельствует о существенной роли техногенных шахтных вод в формировании качества поверхностной и подземной гидросферы. Дополнительным аргументом в пользу такого вывода служат геохимические спектры подземных, речных и шахтных вод, приведенные на рис. 4. Как видно, эти спектры в значительной степени симбатны, т.е. повторяют друг друга (имеют схожий ход изменения).

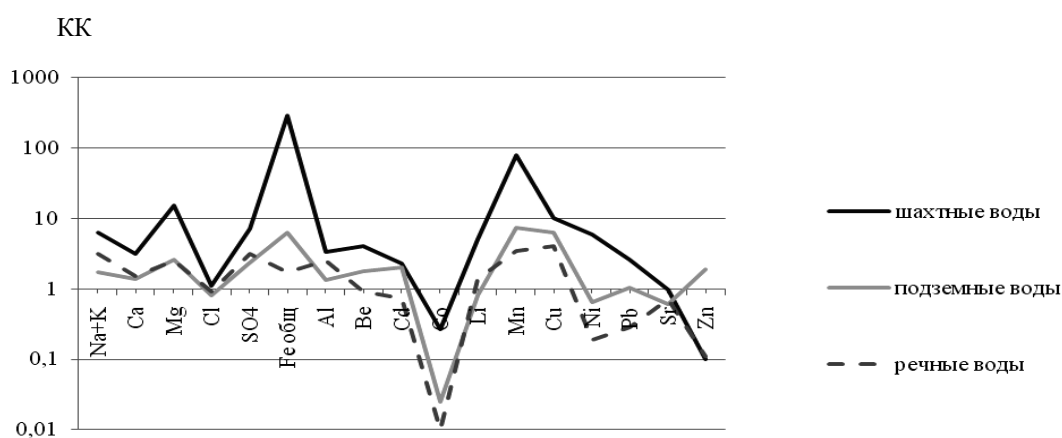


Рис. 4. Геохимические спектры шахтных, подземных и речных вод Восточного Донбасса

Затопление нерентабельных шахт способствовало поступлению техногенных шахтных вод в водоносные горизонты и формированию ореолов распространения сильнозагрязненных подземных вод, непригодных для хозяйственно-питьевого водоснабжения местного населения. Такая обстановка сложилась в ряде населенных пунктов Октябрьского и Красносулинского районов Ростовской области.

Ликвидация объектов добычи угля оказала резко негативное влияние и на качество поверхностных вод за счет сброса на рельеф и поступления в речную сеть сильнозагрязненных шахтных вод. Объектами такого влияния оказались, в частности, реки Кадамовка, Малый и Большой Несветай, Аюта, Кундрючья, Гнилуша, Лихая, Бургуста, Малая Каменка. В них, по некоторым оценкам [7], поступает от 150 до 2500 м<sup>3</sup>/ч таких вод. В результате многие малые реки практически полностью утратили свои природные функции, стали непригодными для использования не только в питьевых, но и в хозяйственных целях. Следует также учитывать высокую вероятность загрязнения речных вод не только сверху, но и снизу в связи с подъемом уровня подземных вод и выходом их на поверхность по

тектонически нарушенным зонам как естественно-го, так и техногенного происхождения. Увеличение питания рек и водоемов подземными водами в результате ликвидации шахт Восточного Донбасса отмечалось рядом исследователей [6, 8].

Таким образом, проведенные выше исследования наглядно продемонстрировали важную роль техногенных геохимических потоков в формировании экологической обстановки в пределах углепромышленных территорий. В связи с этим приоритетной природоохранной задачей становится разработка специализированной системы управления этими потоками с целью минимизации последствий их негативного влияния на компоненты окружающей среды.

#### Литература

1. Никифорова Е.М., Солнцева Н.П. Влияние техногенных потоков на геохимию лесных почв (в связи с угледобычей) // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М., 1982. С. 82–130.
2. Коломенский Г.Ю., Гипич Л.В., Коломенская В.Г. Техногенные месторождения // Проблемы и перспек-



- тивы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. Ростов н/Д., 2005. С. 85–101.
3. Зубова Л.Г., Зубов А.Р., Харламова А.В., Воробьев С.Г., Макаришина Ю.И., Буныченко В.В. Терриконы. Луганск, 2015. 712 с.
  4. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов н/Д., 2002. 296 с.
  5. Девятова А.Ю. Газофазные выбросы в атмосферу при горении угля // Изв. вузов. Горный журн. 2013. № 5. С. 29–34.
  6. Мохов А.В., Журбицкий Б.И., Карасев Г.К., Дымна А.И. Влияние угольного комплекса на геоэкологическую ситуацию // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса. Ростов н/Д., 2005. С. 129–138.
  7. Закруткин В.Е., Иваник В.М., Гибков Е.В. Эколого-географический анализ рисков реструктуризации угольной промышленности в Восточном Донбассе // Изв. РАН. География. 2010. № 5. С. 94–102.
  8. Экологический мониторинг ликвидации неперспективных шахт Восточного Донбасса / под ред. В.М. Еремеева. Шахты, 2001. 82 с.
  2. Kolomenskii G.Yu., Gipich L.V., Kolomenskaya V.G. [Technogenic deposits]. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya mineral'nykh resursov Vostochnogo Donbassa* [Problems and prospects of integrated development of mineral resources of the Eastern Donbass]. Rostov-on-Don, 2005, pp. 85-101.
  3. Zubova L.G., Zubov A.R., Kharlamova A.V., Vorob'ev S.G., Makarishina Yu.I., Bunyachenko V.V. *Terrikony* [Waste heaps]. Lugansk, 2015, 712 p.
  4. Kizil'shtein L.Ya. *Ekogeokhimiya elementov-primesei v uglyakh* [Ecogeochemistry of trace elements in coals]. Rostov-on-Don, 2002, 296 p.
  5. Devyatova A.Yu. *Gazofaznye vybrosy v atmosferu pri gorenii uglya* [The gas-phase emissions from coal combustion]. *Izv. vuzov. Gornyi zhurn.*, 2013, no 5, pp. 29-34.
  6. Mokhov A.V., Zhurbitskii B.I., Karasev G.K., Dymna A.I. [Influence of coal complex geoecological situation]. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya mineral'nykh resursov Vostochnogo Donbassa* [Problems and prospects of integrated development of mineral resources of the Eastern Donbass]. Rostov-on-Don, 2005, pp. 129-138.
  7. Zakrutkin V.E., Ivanik V.M., Gibkov E.V. *Ekologo-geograficheskii analiz riskov restrukturalizatsii ugol'noi promyshlennosti v Vostochnom Donbasse* [Ecological and geographical analysis of the risk of restructuring the coal industry in the Eastern Donbass]. *Izv. RAN. Geografiya*, 2010, no 5, pp. 94-102.
  8. *Ekologicheskii monitoring likvidatsii neperspektivnykh shakht Vostochnogo Donbassa* [Environmental monitoring liquidation of unpromising mines of Eastern Donbass]. Ed. V.M. Eremeev. Shakhty, 2001, 82 p.

#### References

1. Nikiforova E.M., Solntseva N.P. [Influence of technological flows in the forest soil geochemistry (in connection with coal mining)]. *Dobycha poleznykh iskopaemykh i geokhimiya prirodnykh ekosistem* [Mining and geochemistry of natural ecosystems]. Moscow, 1982, pp. 82-130.
8. *Ekologicheskii monitoring likvidatsii neperspektivnykh shakht Vostochnogo Donbassa* [Environmental monitoring liquidation of unpromising mines of Eastern Donbass]. Ed. V.M. Eremeev. Shakhty, 2001, 82 p.

УДК 551. 31 1.21

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-72-75

**СЕЛЕВАЯ ОПАСНОСТЬ ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА**

© 2016 г. Н.В. Кондратьева, К.А. Гегиев, М.Т. Анаев, Г.В. Куповых

Кондратьева Наталья Владимировна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Высокотермальный геофизический институт, пр. Ленина, 2, Нальчик, КБР, 360030, e-mail: kondratyeva\_nat@mail.ru

Kondraty'eva Natalia Vladimirovna – Candidate of Geographical Science, Senior Researcher, High-Mountain Geophysical Institute, Lenin Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: kondratyeva\_nat@mail.ru

Гегиев Касбулат Адальбиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией гидрологии горных территорий, Высокотермальный геофизический институт, пр. Ленина, 2, Нальчик, КБР, 360030, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Gegiev Kasbulat Adal'bievich – Candidate of Technical Science, Head of the Hydrology of Mountain Areas Laboratory, High-Mountain Geophysical Institute, Lenin Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Анаев Махти Тасимович – научный сотрудник, лаборатория гидрологии горных территорий, Высокотермальный геофизический институт, пр. Ленина, 2, Нальчик, КБР, 360030, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Anaev Makhti Tasimovich – Researcher, Hydrology of Mountain Areas Laboratory, High-Mountain Geophysical Institute, Lenin Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: vgikbr@yandex.ru

Куповых Геннадий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, 347928, e-mail: kupovykh@sfnu.ru

Kupovykh Gennadii Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, Head of Department of Mathematics, Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, Nekrasovskii Lane, 44, Taganrog, 347928, Russia, e-mail: kupovykh@sfnu.ru

Представлены карты зонирования селевых бассейнов территории Восточного Кавказа (в пределах РФ) по максимальному единовременному объему твердой составляющей селя с выделением генетического типа водной составляющей и создание базы данных селевых характеристик. Полученные карта и база данных в современных условиях актуальны для развития рекреационных комплексов республик Восточного Кавказа, а также безопасности жизнедеятельности людей.

**Ключевые слова:** селевой бассейн, карта, база данных, генезис.

The article presents the mapping of zoning mud pools in Eastern Caucasus (within the Russian Federation) to the maximum one-time amount of the solid component of lodging with the release of the genetic component such as water, and the creation of mud characteristics database. The resulting map and database in the current conditions are relevant for the development of recreational facilities of the Eastern Caucasus republics, as well as the health and safety of people.

**Keywords:** mudflow pool, map, database, genesis.

В последние годы руководством страны приняты приоритетные национальные проекты, в рамках которых большое внимание уделено созданию рекреационных зон в горной местности. В условиях интенсивного освоения горных территорий Восточного Кавказа обостряется проблема обеспечения безопасности населения и объектов рекреации от воздействия селевых потоков.

В связи с этим все большую актуальность получает проблема селевой безопасности, решение которой невозможно без тщательного изучения режима селей, их пространственного распространения.

Цель данной работы – составление карты зонирования селевых бассейнов территории Восточного Кавказа (в пределах РФ) по максимальному единовременному объему твердой составляющей селя с выделением генетического типа водной составляющей селей и создание базы данных селевых характеристик.

В географическом отношении рассматриваемый регион находится на северном склоне Главного хребта Большого Кавказа и простирается на 480 км от г. Казбек на восток до Апшеронского полуострова [1].

Высокогорья Восточного Кавказа образованы частью Главного Кавказского (Водораздельного) хребта, звеньями Бокового хребта и расположенными между ними межгорными котловинами. Высшей точкой рассматриваемого региона является г. Базардюзю (4466 м).

В геологическом плане высокогорья сложены главным образом глинистыми сланцами, песчаниками и известняками ниже- и среднеюрского мезозойского и палеоген-неогенового возраста [2].

На Восточном Кавказе лето жаркое, а зима сравнительно мягкая, но неустойчивая. Среднегодовая температура в западной половине Восточного Кавказа равна на высотах: до 500 м – +13 °С, 1000 м – +7,5 °С,

2000 м – +3 °С, 3000 м – минус 1 °С; в восточной половине – соответственно тем же высотам: +11, +9, +5 и минус 1 °С [3]. В высокогорье Восточного Кавказа осадков выпадает в среднем 1000–1250 мм, в горах Дагестана – 600–800 мм в год [4]. Оледенение Восточного Кавказа из-за большой сухости климата незначительно и представлено главным образом небольшими ледниками – каровыми, висячими, карово-долинными [5].

Реки, протекающие по территории Восточного Кавказа, принадлежат к бассейну Каспийского моря. Все они являются притоками разных порядков р. Терек. По многим рекам наблюдаются селевые явления, которые иногда носят катастрофический характер.

Данная работа основана на архивных, литературных, фондовых материалах, а также данных, полученных при непосредственном участии авторов в выполнении НИР по селевой деятельности на территории республик Восточного Кавказа [5–8].

На Восточном Кавказе сегодня выявлено 557 селевых бассейнов, которые находятся на территориях республик Дагестан, Чечня и Ингушетия. С 50-х г. XX в. по 2015 г. в рассматриваемом регионе зафиксировано 112 селевых потоков. Селевые потоки наблюдаются в высотном диапазоне от 400 до 4 000 м. Основная часть селей зарождается

Карта зонирования селевых бассейнов территории Восточного Кавказа по максимальному единовременному объему твердой составляющей селя с выделением генетического типа водной составляющей

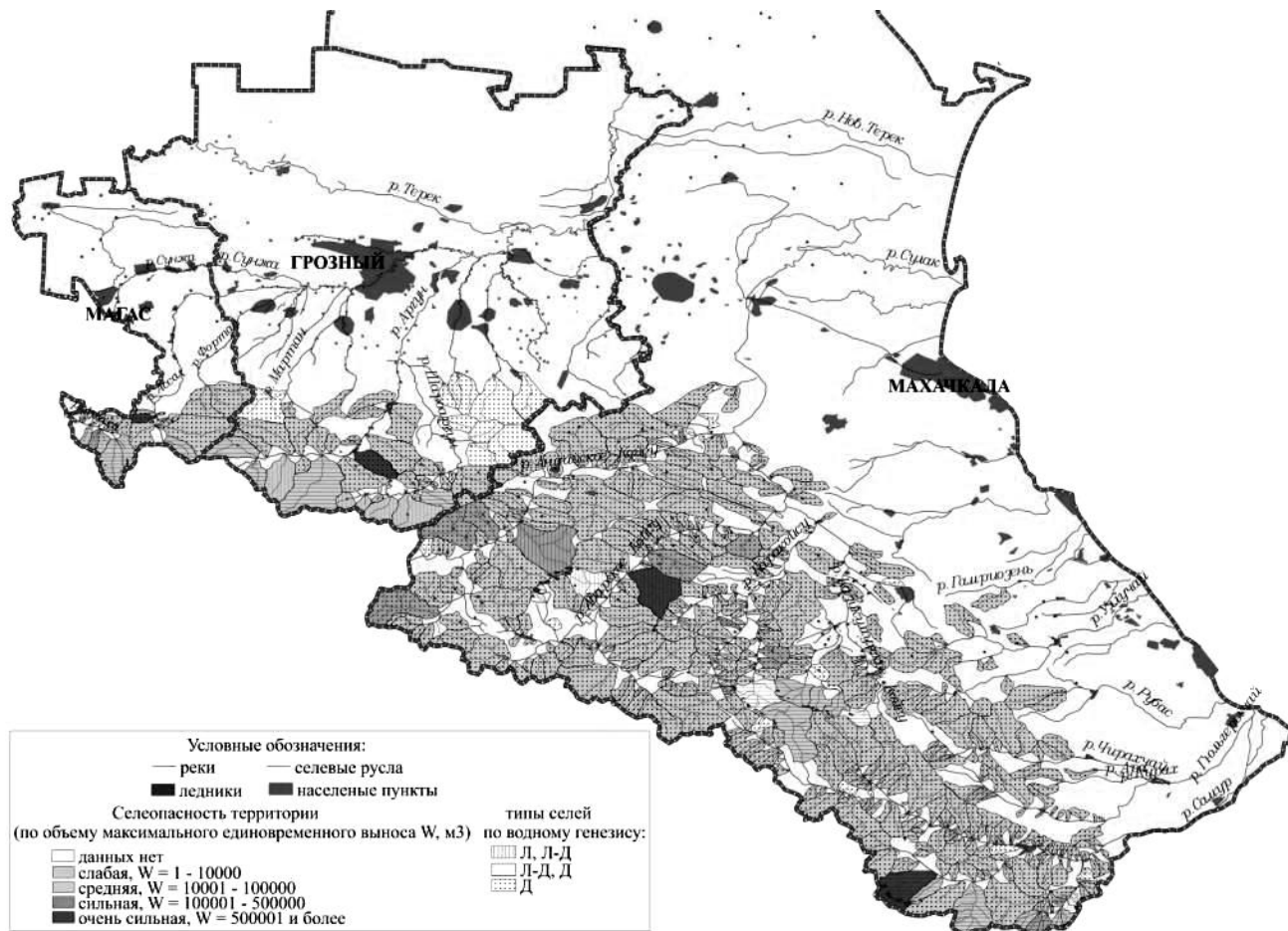
выше 2 000 м в субнивальном и альпийском поясах. По типу преобладают грязевые селевые потоки, по генезису водной составляющей – дождевые. Объемы селевых потоков в основном малой и средней мощности (от 1 до 50 000 м<sup>3</sup>). В настоящее время сели периодически угрожают 377 народнохозяйственным объектам [8].

На территории Дагестана практически все горные водотоки являются селевыми. К настоящему времени выявлено 487 селевых бассейнов. Общая площадь пораженности селями в республике приблизительно равна 12 488 км<sup>2</sup>, что составляет 25 % от всей площади Дагестана [6, 8].

На территории Чеченской Республики выявлено 47 селевых бассейнов. Общая площадь, пораженная селями, приблизительно равна 2600 км<sup>2</sup>, что составляет 17 % от всей площади республики [7, 8].

На территории Ингушетии выявлено 23 селевых бассейна. Общая площадь пораженности селями приблизительно равна 670 км<sup>2</sup>, что составляет 17 % от всей площади республики [5, 8].

На рисунке представлена карта зонирования селевых бассейнов территории Восточного Кавказа (в пределах РФ) по максимальному единовременному объему твердой составляющей селя с выделением генетического типа водной составляющей селя.



В таблице представлена база данных селевых характеристик бассейнов Восточного Кавказа. Здесь собрана информация о масштабах и режиме проявления селевой деятельности на территориях республик Восточного Кавказа.

Полученные карта и база данных в современных условиях актуальны для развития рекреационных комплексов республик Восточного Кавказа, а также безопасности жизнедеятельности людей.

### База данных селевых характеристик бассейнов Восточного Кавказа

Восточный Кавказ											
№	Название водотока	Адрес селевого бассейна	Генезис селя	Тип селя	Площадь бассейна S, км <sup>2</sup>	Средний уклон русла α, ‰	Длина реки L, км	Высота истока Н, м абс.	Объем максимального единовременного выноса W, тыс. м <sup>3</sup>	Дополнительные сведения	Повторяемость 1 раз в п лет/ даты схода
Республика Дагестан											
р. Сулак с р. Андийское Койсу (от истоков до Чиркейского водохранилища)											
1-01	Ахсу	исток	Д		37,2	108	6,4	1810	50 – 100	Угроза автодороге, с. Ахсу	8-15/-
1-02	б/н	п.п. р. Ахсу	Д		6,7	126	3,6	1559	–		-/-
1-03	б/н	п.п. р. Ахсу	Д		6,5	244	1,5	1124	< 10		30/-
...	.....	.....	.....	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Чеченская Республика											
р. Марган (истоки)											
1-01	б/н	л.п. р. Рошня	Д		108	55	22,2	1876	–	Угроза с. Ялхорой	-/-
1-02	б/н	л.п. р. Рошня	Д		15,5	158	7,6	2240	<10		8-15/-
1-03	Марган	исток	Д	ГК	51	87	16,5	2189	50 – 100		8-15/-
...	.....	.....	.....	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Республика Ингушетия											
р. Армхи (от истоков до притока № 1-13)											
1-01	Обен	л.п. р. Армхи	Л-Д,Д		14,7	215	5,7	2481	<10	Угроза дороге	8-15/-
1-02	Ляжги	л.п. р. Армхи	Л-Д,Д		15	285	3,9	2495	100	Угроза дороге	более 100/1890
1-03	Эрзи	л.п. р. Армхи	Л-Д,Д		18,4	171	4,8	2142	<10	Угроза дороге	16-30/-
...	.....	.....	.....	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

**Примечание.** «-» – данных нет; б/н – без названия; п.п. – правый приток; л.п. – левый приток. Генезис водной составляющей: Д – дождевой; Д-С – снего-дождевой; Л – ледниковый; Л-Д – ледниково-дождевой. Тип селя по гранулометрическому составу: ГК – грязекаменный; ВК – водокаменный (из-за большого объема приведен только фрагмент базы данных).

### Литература

1. Анохин Г.И. Восточный Кавказ. М., 1978. 184 с.
2. Акаев Б.А., Атаев З.В., Гаджиев Б.С. Физическая география Дагестана. М., 1996. 384 с.
3. Атаев З.В. Высокогорные ландшафты Восточного Кавказа и их современное экологическое состояние // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 12. С. 130.
4. Атаев З.В. Горные холодно-умеренные ландшафты Восточного Кавказа // Молодой ученый. 2012. № 3. С. 132.
5. Районирование селевых бассейнов Ингушетии по критерию селеопасности для инженерной инфраструктуры хозяйствующих объектов и населенных пунктов с составлением электронной базы данных и картографических материалов: отчет о НИР. Нальчик, 2012. 70 с.
6. База данных в виде компьютерной программы, обеспечивающей возможности анализа и синтеза информации о параметрах лавинно-селевой опасности на территории Республики Дагестан: отчет НИР. Нальчик, 2007. 203 с.
7. Инженерно-геологическое обследование территории КБАССР, СОАССР, ЧИАССР и КЧАО за 1972–1975 гг.: отчет НИР. Нальчик, 1976. 149 с.
8. Кондратьева Н.В., Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Гяургиева М.М., Перов В.Ф., Разумов В.В., Сейнова И.Б., Хучунаева Л.В. Кадастр селевой опасности юга европейской части России. М.; Нальчик, 2015. 148 с.

### References

1. Anokhin G.I. *Vostochnyi Kavkaz* [Eastern Caucasus]. Moscow, 1978, 184 p.
2. Akaev B.A., Ataev Z.V., Gadzhiev B.S. *Fizicheskaya geografiya Dagestana* [Physical geography of Dagestan]. Moscow, 1996, 384 p.

3. Ataev Z.V. Vysokogornye landschafty Vostochnogo Kavkaza i ikh sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie [Alpine landscape of the Eastern Caucasus and their modern ecological condition]. *Molodoi uchenyi*, 2011, vol. 1, no 12, p. 130.
4. Ataev Z.V. Gornye kholodno umerennye landschafty Vostochnogo Kavkaza [Mountain cold temperate landscapes of the Eastern Caucasus]. *Molodoi uchenyi*, 2012, no 3, p. 132.
5. Raionirovanie selevykh basseinov Ingushetii po kriteriyu seleopasnosti dlya inzhenernoi infrastruktury khozyaistvuyushchikh ob"ektov i naseleennykh punktov s sostavleniem elektronnoi bazy dannykh i kartograficheskikh materialov [Zoning of Ingushetia mud pools on mudflow risk criterion for managing physical infrastructure facilities and settlements with the preparation of an electronic database and cartographic materials]. Research report. Nalchik, 2012, 70 p.
6. Baza dannykh v vide komp'yuternoï programmy, obespechivayushchei vozmozhnosti analiza i sinteza informatsii o parametrakh lavinno-selevoi opasnosti na territorii respubliki Dagestan [The database is in the form of a computer program, which provides opportunities for analysis and synthesis of information on the parameters of avalanche debris flow hazard in the territory of the Republic of Dagestan]. Research report. Nalchik, 2007, 203 p.
7. Inzhenerno-geologicheskoe obsledovanie territorii KBASSR, SOASSR, ChIASSR i KChAO za 1972–1975 gg. [Engineering and geological survey of the territory KBASSR, SOASSR, CHIASSR and KChAO for 1972-1975]. Research report. Nalchik, 1976, 149 p.
8. Kondrat'eva N.V., Adzhiev A.Kh., Bekkiev M.Yu., Gyaurgieva M.M., Perov V.F., Razumov V.V., Seinova I.B., Khuchunaeva L.V. Kadastr selevoi opasnosti yuga evropeiskoi chasti Rossii [Inventory of mudflow danger south of the European part of Russia]. Moscow; Nalchik, 2015, 148 p.

---

*Поступила в редакцию*

*17 июня 2016 г.*

УДК 504.054

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-76-79

## ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДСКИХ ЭКОСИСТЕМ

© 2016 г. Г.В. Куповых, О.О. Дахова, Б.М. Хучунаев

*Куповых Геннадий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог 347928, e-mail: kupovykh@svedu.ru*

*Дахова Оксана Олеговна – кандидат географических наук, доцент, кафедра географии, Институт химии и биологии Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, e-mail: dakhva@rambler.ru*

*Хучунаев Бузигит Муссаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией микрофизики облаков, Высокотурный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, e-mail: buzgigit@mail.ru*

*Kupovykh Gennadii Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, Head of Department of Mathematics, Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, Nekrasovskii Lane, 44, Taganrog, 347928, Russia, e-mail: kupovykh@svedu.ru*

*Dakhova Oksana Olegovna – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Department of Geography, Institute of Chemistry and Biology of the Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevskii St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: dakhva@rambler.ru*

*Khuchunaev Buzigit Mussaevich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Senior Researcher, Department of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Lenin Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: buzgigit@mail.ru*

*Исследуется загрязнение атмосферного воздуха промышленными предприятиями (на примере г. Нальчика). Было выявлено, что некоторые загрязняющие вещества превышают предельно допустимую концентрацию. Рассчитан индекс загрязнения атмосферы. Впервые определены зоны повышенного загрязнения г. Нальчика. Сделан вывод о значительном антропогенном загрязнении воздушного бассейна исследуемой территории.*

**Ключевые слова:** атмосферный воздух, загрязняющие вещества, индекс загрязнения атмосферы, предельно допустимая концентрация, промышленные предприятия.

*In this paper we investigate air pollution by industrial enterprises (the example of the city of Nalchik). It has been revealed that some contaminants exceed maximum permissible concentration. Calculate the air pollution index. For the first time revealed high pollution areas of the city of Nalchik. Concluded that significant anthropogenic pollution of the air basin of study area.*

**Keywords:** atmospheric air, polluting substances, air pollution index, maximum permissible concentration, industrial enterprises.

Интенсивное воздействие человека на природу, негативные, часто необратимые последствия антропогенного влияния обуславливают необходимость глубокого и всестороннего анализа проблемы взаимодействия общества и природы. Жизнь четверти городского населения России протекает в экологически неблагоприятной обстановке, связанной с загрязнением воздушного бассейна городов, а 3 % городских жителей живут в условиях чрезвычайно опасного уровня загрязнения.

Экологическое состояние воздушного бассейна городов в основном определяется количеством источников выбросов и концентрацией загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу. Исследование этих процессов является первым этапом в решении проблемы обеспечения нормальных экологических условий населению с минимальным ущербом для экономики города. В связи с этим

возрастает актуальность исследования состояния воздушного бассейна курортных территорий.

Под загрязнением атмосферы следует понимать изменение ее состава при поступлении примесей естественного или антропогенного происхождения. Вещества-загрязнители бывают трех видов: газы, пыль и аэрозоли. К последним относятся диспергированные твердые частицы, выбрасываемые в атмосферу и находящиеся в ней длительное время во взвешенном состоянии.

При оценке загрязнения атмосферы важен также период времени, в течение которого загрязняющие вещества сохраняются в ней. Скапливаясь в атмосфере, загрязнители взаимодействуют друг с другом, гидролизуются и окисляются под действием влаги и кислорода воздуха, а также изменяют свойства под воздействием радиации. Вследствие этого продолжительность пребывания токсичных приме-

сей в атмосфере тесно связана с их химическими свойствами. В табл. 1 приведено время пребывания некоторых веществ в атмосфере [1, 2].

Таблица 1

### Время пребывания веществ в атмосфере

Элемент или соединение	Среднее время пребывания в атмосфере
Гелий	$10^7$ лет
Азот	$10^6-2 \cdot 10^7$ лет
Кислород	$5 \cdot 10^3-10^4$ лет
Диоксид углерода	5–10 лет
Водород	4–8 лет
Метан	4–7 лет
Оксид диазота	2,5–4 года
Озон	0,3–2 года
Оксид углерода	0,2–0,5 года
Диоксид азота	8–11 сут
Вода	10 сут
Сульфат-ион	10 сут
Оксид азота	9 сут
Аммиак	5–6 сут
Ион аммония	6 сут
Нитрат-ион	5 сут
Диоксид серы	2–4 сут
Дигидросульфид	0,5–4 сут
Органический углерод	2 сут

Весьма опасна способность многих загрязняющих соединений вступать в реакцию друг с другом и образовывать в ряде случаев еще более вредные вещества [3].

Город Нальчик – столица Кабардино-Балкарской Республики, расположен в предгорьях Большого Кавказа на р. Нальчик (бассейн Терека) в 1873 км к югу от Москвы. Географическая широта Нальчика –  $43^{\circ}29'$ , географическая долгота –  $43^{\circ}37'$ .

Состояние атмосферного воздуха и окружающей среды г. Нальчика в целом считается относительно чистым и безвредным в связи с тем, что в структуре промышленно-производственного комплекса не оказалось предприятий, производственно-хозяйственная деятельность которых была бы связана с выбросами в атмосферу большого количества высокотоксичных веществ (крупные ТЭЦ, чугуно-литейные и сталеплавильные мощности, нефте- и газоперерабатывающие комплексы, предприятия по производству химических и белково-витаминных концентратов, резинотехнических изделий и т.п.). Кроме того, некоторые предприятия, наносившие ранее определенный вред атмосфере, с середины 90-х гг. прекратили свою производственную деятельность, либо работают вполсилы, либо перешли на выпуск другой, менее обременительной для атмосферного воздуха продукции [4].

В Нальчике находится большое количество предприятий различных отраслей промышленно-

сти. Нами исследовано 72 промышленных предприятия, наиболее крупными из которых являются ОАО «Нальчикский машиностроительный завод», ОАО «Нальчикский завод высоковольтной аппаратуры», ОАО «Гидрометаллург», ОАО «Телемеханика» [5]. Основная часть промышленных объектов расположена в северо-западной, северной и северо-восточной частях города.

Из всех загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу г. Нальчика, концентрация 13 загрязняющих веществ превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК). Из них всего 9 соединений (оксид железа, марганец и его соединения, диоксид азота, аммиак, сероводород, углеводороды  $C_1-C_5$ , масло минеральное нефтяное, неорганическая и древесная пыль) охватывают селитебные ландшафты города [6].

Было проведено сравнение данных, полученных расчетным методом с инструментальными замерами. В качестве инструментальных использовались материалы Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор), которые проводят контроль за состоянием окружающей среды. Обязательными исследуемыми веществами в атмосферном воздухе являются неорганическая пыль, диоксид азота, оксид углерода и диоксид серы.

По данным Роспотребнадзора, на перекрестке пр. Ленина и ул. Ногмова из 40 исследованных проб в 4 случаях концентрация диоксида азота составляет 1,1–2,0 ПДК. На перекрестке пр. Ленина и ул. Кешокова из 20 исследованных проб в 4 случаях концентрация диоксида азота составляет 1,1–2,0 ПДК. На перекрестке ул. Ватутина и Головки из 20 исследованных проб в одном случае концентрация диоксида азота составляет 1,1–2,0 ПДК.

На перекрестках пр. Ленина – ул. Головки, пр. Ленина – ул. Кешокова, ул. Кирова – пр. Кулиева, ул. Ватутина – ул. Головки в некоторых случаях наблюдается повышенное содержание в атмосферном воздухе фенола, и концентрация его составляет 1,1–5,0 ПДК.

В районе гидрометаллургического завода из 86 исследованных проб в 8 случаях концентрация аммиака – 1,1–2,0 ПДК и в 5 случаях – 2,1–5,0 ПДК. Из 91 исследованной пробы в 7 случаях концентрация сероводорода составляет 1,1–2,0 ПДК, в 15 случаях – 2,1–5,0 и в 5 случаях – больше 5,1 ПДК.

Концентрация оксида углерода и диоксида серы, поступающая в атмосферный воздух г. Нальчика, не превышает ПДК.

Было проведено сравнение концентраций загрязняющих веществ, полученных расчетным и инструментальными методами, контролируемых на постах наблюдений (табл. 2).

Таблица 2

**Расчетные и измеренные концентрации загрязняющих веществ, контролируемых на постах наблюдений**

Наименование перекрестков	Перечень веществ, контролируемых на постах наблюдений	Расчетные значения, мг/м <sup>3</sup>	Измеренные значения, мг/м <sup>3</sup>
Пр. Ленина – ул. Кешокова	Диоксид азота	0,06206	0,084
	Пыль неорганическая	0,06532	0,060
	Диоксид серы	0,06916	0,035
	Оксид углерода	0,59200	1,000
Пр. Кулиева – ул. Кирова	Диоксид азота	0,03195	0,062
	Пыль неорганическая	0,07040	0,080
	Диоксид серы	0,07470	0,060
	Оксид углерода	0,46500	0,450
Ул. Мальбахова – ул. Идарова	Диоксид азота	0,02253	0,142
	Пыль неорганическая	0,06848	0,015
	Диоксид серы	0,05808	0,025
	Оксид углерода	0,57330	1,200
Ул. Идарова – ул. Кабардинская	Диоксид азота	0,01425	0,228
	Пыль неорганическая	0,07158	0,015
	Диоксид серы	0,06878	0,040
	Оксид углерода	0,83190	2,500
Ул. Байсултанова – ул. Ватутина	Диоксид азота	0,03500	0,074
	Пыль неорганическая	0,06113	0,140
	Диоксид серы	0,24420	0,070
	Сероводород	0,05148	0,00136
	Оксид углерода	0,77000	0,500

Для определения согласованности результатов расчетов и данных, полученных инструментальным методом, был рассчитан коэффициент корреляции, который составил 0,91, это показывает хорошую согласованность между данными, полученными расчетным и инструментальным методами.

Для оценки степени суммарного загрязнения атмосферы рядом веществ в городах России используется комплексный показатель – индекс загрязнения атмосферы (ИЗА). Он показывает, какому уровню загрязнения атмосферы (в единицах ПДК диоксида серы) соответствуют фактически наблюдаемые концентрации веществ в городской атмосфере, т.е. во сколько раз суммарный уровень загрязнения воздуха превышает допустимое значение по рассматриваемой совокупности примесей в целом [7].

Для расчета ИЗА использовали 5 веществ, которые определяют основной вклад в создание высокого уровня загрязнения городов – марганец и его соединения, диоксид азота, формальдегид, аммиак и неорганическая пыль с содержанием 20–70 % диоксида кремния.

Индекс загрязнения атмосферы г. Нальчика показал, что низкий уровень загрязнения наблюдается в районе Долинска (4,8) и Вольного Аула (3,7). Курортная зона (Долинск) и жилая зона Вольный Аул по значению ИЗА характеризуются относи-

тельно благоприятными экологическими условиями. Состав этих зон различен. В Вольном Ауле преобладают ландшафты одноэтажной жилой застройки, курортная зона состоит из рекреационных ландшафтов в виде крупных санаторных комплексов, ландшафтов культурных лесов (городского парка) и урбанистических ландшафтов, объединяющих два подтипа: ландшафты общественной застройки и зеленых насаждений. Сближают эти зоны близость к центру города с высоким уровнем химического загрязнения и подветренное положение по отношению к имеющим до 18 % повторяемости в годовом цикле ветрам с северо-востока, которые переносят вредные примеси от района сосредоточения индустриальных ландшафтов.

Повышенное загрязнение наблюдается в районе Александровки (6,3). В этом районе преобладают селитебные ландшафты одноэтажной застройки.

Высокое загрязнение наблюдается в районах Искожа (7,5), Центра (7,9), Еврейской колонки (8,3), Затишья (9,3), Стрелки (10,7), Горной (13,5). Очень высокое загрязнение наблюдается в районе железнодорожного вокзала (21,4).

Эти районы характеризуются зонами с достаточно неблагоприятными экологическими условиями. Урбанистические ландшафты зоны Искож



состоят из ландшафтов многоэтажной жилой и общественной застройки. Сеть автодорожных ландшафтов внутри зоны редка, однако внешние транспортные магистрали обеспечивают значительное количество загрязняющих веществ. Остальные жилые зоны характеризуются различным сочетанием ландшафтов одноэтажной и многоэтажной жилой застройки, а также достаточно густой сетью автодорожных ландшафтов [8].

Значительные массивы урбанизированных ландшафтов на территории города находятся в различных по степени неблагоприятности экологических условиях. Особенно это относится к жилым зонам в центральной части города. В наименьшей степени подвержены воздействию негативных экологических факторов зоны и слагающие их ландшафты, расположенные на периферии городской территории, которые удалены и от напряженных транспортных магистралей, и от источников промышленного загрязнения.

### Выводы

1. Определено, что из всех загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу Нальчика от промышленных предприятий и автомобильного транспорта, концентрация 13 загрязняющих веществ превышает ПДК. Из них 9 соединений (оксид железа, марганец и его соединения, диоксид азота, аммиак, сероводород, углеводороды C<sub>1</sub>–C<sub>5</sub>, масло минеральное нефтяное, неорганическая и древесная пыль) охватывают селитебные ландшафты города.

2. Проведено сравнение концентраций загрязняющих веществ, контролируемых на постах наблюдений и получено их хорошее согласование (коэффициент корреляции составляет 0,91).

3. Констатируется, что низкий уровень загрязнения наблюдается в районах Долинска (4,8) и Вольного Аула (3,7). Повышенное загрязнение – в районе Александровки (6,3). Высокое загрязнение – в районах Искожа (7,5), Центра (7,9), Еврейской колонки (8,3), Затишья (9,3), Стрелки (10,7), Горной (13,5). Очень высокое загрязнение наблюдается в районе железнодорожного вокзала (21,4).

### Литература

1. Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: Технология и контроль / пер. с англ. Н.Г. Вашкевича. Л., 1989. 287 с.
2. Другов Ю.С., Беликов А.Б., Дьякова Г.А., Тульгинский В.М. Методы анализа загрязнений воздуха. М., 1984. 384 с.
3. Марцинкевич Г.И. Использование природных ресурсов и охрана природы. 2-е изд. Мн., 1985. 215 с.
4. Пleshkhov X.X. Охрана окружающей среды КБР. Нальчик, 2007. 136 с.
5. Дахова О.О. Антропогенное загрязнение воздушного бассейна г. Нальчика // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: материалы 9-й науч.-практ. конф., май 2009 г. М., 2009. С. 30–31.
6. Дахова О.О. Загрязнение воздушного бассейна г. Нальчика промышленными предприятиями // Тез. докл. науч. конф. к 100-летию акад. Е.К. Федорова. М., 2009. С. 23.
7. Методика расчета комплексного показателя атмосферы. СПб., 2002. 8 с.
8. Перекрест В.В., Разумов В.В. Ландшафтно-экологическое районирование территории г. Нальчика по комплексу факторов среды // Экология урбанизированных территорий. 2008. № 3. С. 54–60.

### References

1. Bretshnaider B., Kurfyurst I. *Okhrana vozdušnogo basseina ot zagryaznenii: Tekhnologiya i kontrol'* [Air protection from pollution: Technology and control]. Transl. from English N.G. Vashkevich. Leningrad, 1989, 287 p.
2. Drugov Yu.S., Belikov A.B., D'yakova G.A., Tul'ginskii V.M. *Metody analiza zagryaznenii vozdukha* [Methods for analysis of air pollution]. Moscow, 1984, 384 p.
3. Martsinkevich G.I. *Ispol'zovanie prirodnykh resursov i okhrana prirody* [The use of natural resources and environmental protection]. 2nd ed. Minsk, 1985, 215 p.
4. Pleshkhov Kh.Kh. *Okhrana okruzhayushchei srede KBR* [KBR environmental protection]. Nalchik, 2007, 136 p.
5. Dakhova O.O. [Nalchik anthropogenic air pollution]. *Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsii* [Problems of forecasting of emergency situations]. 9 scientific-practical. conf. May, 2009. Moscow, 2009, pp. 30-31.
6. Dakhova O.O. [Air pollution Nalchik industrial enterprises]. *Tez. dokl. nauch. konfer. 100-letie akad. E.K. Fedorova* [Mes. rep. scientific. conf. 100th anniversary of acad. E.K. Fedorov]. Moscow, 2009, p. 23.
7. *Metodika rascheta kompleksnogo pokazatelya atmosfery* [The method of calculating the complex index of the atmosphere]. Saint Petersburg, 2002, 8 p.
8. Perekrest V.V., Razumov V.V. *Landshaftno-ekologicheskoe raionirovanie territorii g. Nal'chika po kompleksu faktorov sredy* [Landscape-ecological zoning of the territory of Nalchik on a range of environmental factors]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 2008, no 3, pp. 54-60.

УДК 550.8

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-80-86

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСТОРИЧЕСКОГО И ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОЦЕНКИ ГАЗОНОСНОСТИ ЕЙСКОЙ ПЛОЩАДИ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

© 2016 г. И.Ю. Самойленко, Э.С. Сианисян

Самойленко Иван Юрьевич – младший научный сотрудник, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть», г. Волгоград, ул. Рабоче-Крестьянская, 30а, г. Волгоград, 400074, e-mail: lavina9107@mail.ru

Сианисян Эдуард Саркисович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: edward@sfedu.ru

Samoilenko Ivan Yuri'evich – Junior Researcher, LUKOIL-Engineering Limited VolgogradNIPImorneft Branch Office in Volgograd, Raboche-Krest'yanskaya, 30a, Volgograd, 400074, Russia, e-mail: lavina9107@mail.ru

Stanisyan Eduard Sarkisovich – Doctor of Geological and Mineralogical Science, Professor, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: edward@sfedu.ru

Приводится разработанный авторами методологический подход оценки перспективности отложений, учитывающий геологическое строение и развитие изучаемой территории, историю ее геолого-геофизического изучения, критические оценки возможностей и результатов используемых методов установления продуктивности объекта, системный подход к данной проблеме. Представлена также разработанная авторами методика совместной интерпретации толщин горизонтов для оценки тектонической активности, определения времени формирования перспективных структур, что в значительной степени определяет продуктивность объектов.

**Ключевые слова:** оценка продуктивности, методология, системный анализ, интерпретация данных, палеотектонический анализ

The study provides the methodological approach to assess the prospectivity of the deposits which considers the geological structure and degree of development of the area under study, the history of its geological and logging surveys, critical assessments of possibilities and of the results of the methods used to determine target productivity and system approach to the problem. The authors also proposed the methods of sequential interpretation of thicknesses which made possible the assessment of tectonism predetermining target productivity.

**Keywords:** efficiency assessment, methodology, system analysis, data interpretation, paleotectonic analysis.

При работе на площадях с неравномерной и малой изученностью основной задачей для исследователя является определение перспективных направлений для продолжения дальнейших геологоразведочных работ. Первым шагом на пути к решению этой задачи является анализ истории геолого-геофизического изучения территории. Авторами предлагается методология, которая базируется на знании геологического строения и развития изучаемой территории, истории его геолого-геофизического изучения, критической оценки возможностей и результатов используемых методов установления продуктивности объекта, системном подходе к данной проблеме [1].

Основные методологические принципы отражены на рис. 1, который наглядно показывает этапность проведения работ и формирование представлений о геологическом строении во времени. Количество этапов для каждой территории может быть различно в зависимости от истории изучения региона. Для удобства на общей схеме изображена последовательность из двух предшествующих этапов и современный этап. Разрыв между вторым и

современным этапами означает, что количество этапов между ними неограниченно. Неизменными остаются внутренняя структура этапов и их связи между собой.

В соответствии с принципами этапности, изображенными на рис. 2, на территории Ейской площади (Ейский полуостров и северо-восточная часть Азовского моря), выделяется 4 основных этапа изучения.

*Первый этап.* Планомерное систематическое изучение глубинного строения северо-западного Предкавказья геофизическими методами разведки начато в 1945 г. и на первом этапе (1945–1949 гг.) носило рекогносцировочный характер. Комплексные магнитометрические, гравиметрические, электроразведочные и сейсмические исследования позволили установить связь гравитационных и магнитных аномалий с глубинным строением региона, изучить основные черты строения фундамента и осадочного чехла, выделить крупные структурные элементы – Восточно-Кубанскую впадину, Каневско-Березанский вал, Ирклиевскую синклираль и др.

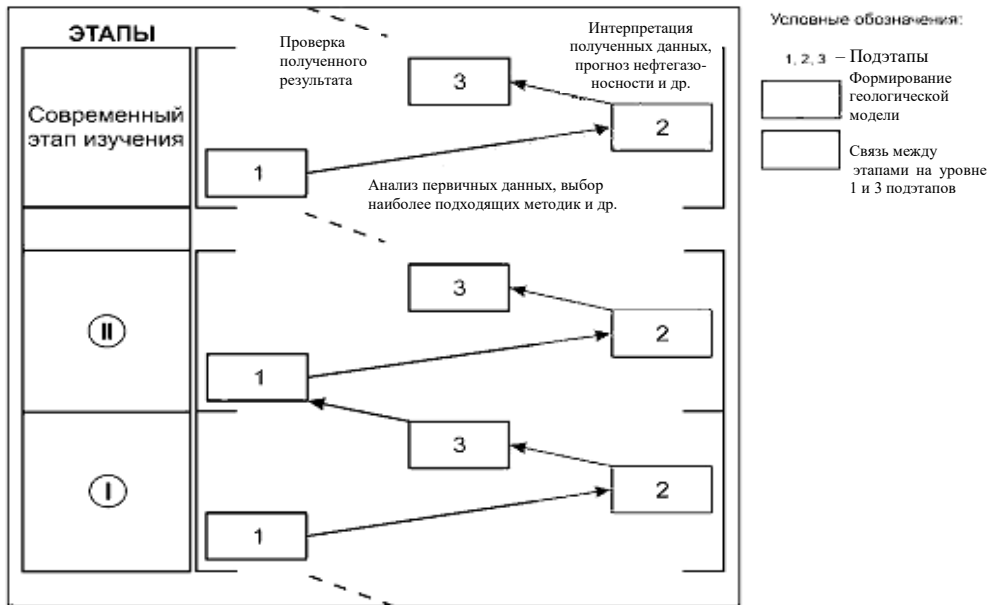


Рис. 1. Основные закономерности накопления информации и развития представлений о геологическом строении территорий

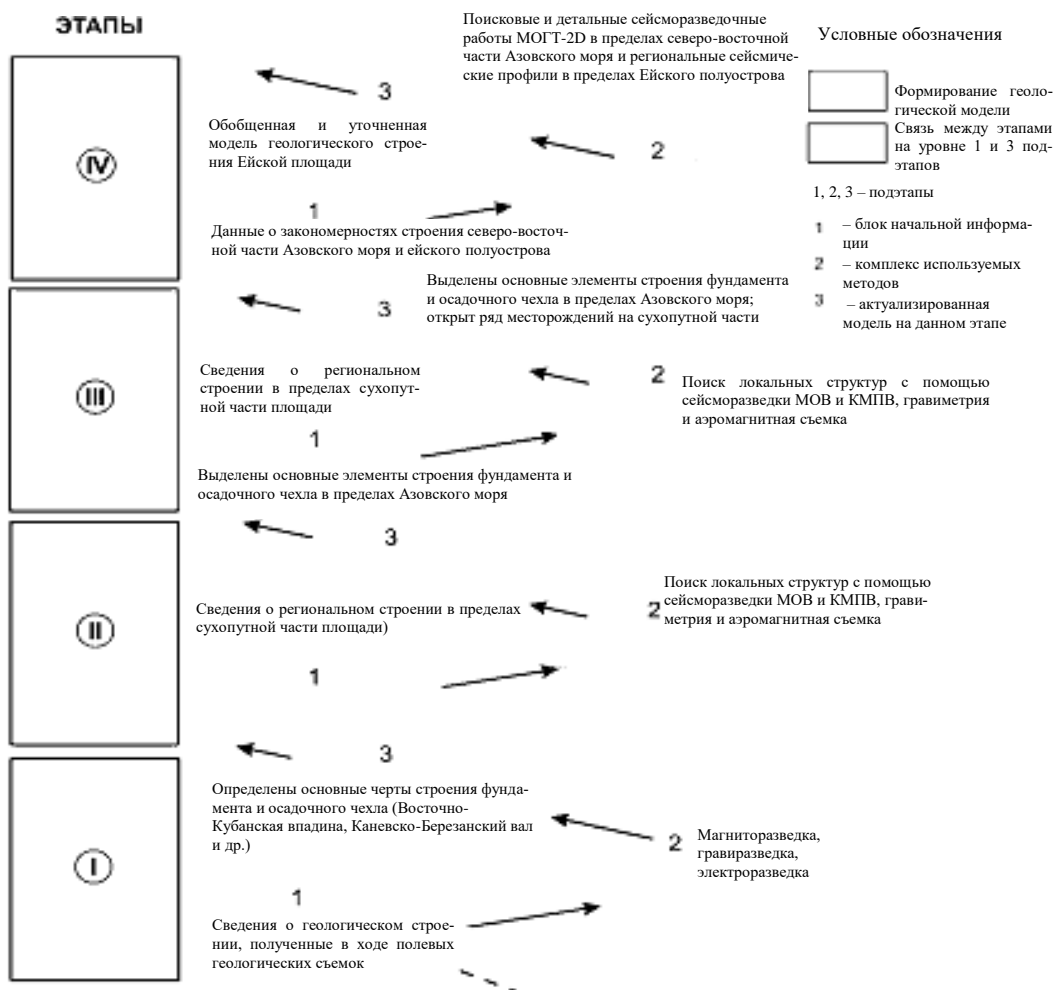


Рис. 2. Этапы изучения Ейской площади

В комплексе с данными глубокого опорного бурения эти работы позволили определить основные направления поисково-разведочных работ на нефть и газ.

*Второй этап* систематических региональных и поисковых геолого-геофизических исследований Ейского полуострова и прилегающей акватории Азовского моря (Ейская площадь) начался с 1949 г. Цель – поиск погребённых локальных структур, осложняющих более крупные локальные элементы. В соответствии с этим комплекс методов состоял из широко применяемых в то время сейморазведки метода отраженных волн (МОВ) и корреляционного метода преломлённых волн (КМПВ), а также гравиметрической и аэромагнитной съемок. В результате сейсмических исследований в 1949 г. по нижнемеловым отложениям выделены Новоминское и Щербиновское поднятия. В 1950–1952 гг. в пределах Новоминского поднятия пробурена опорная скважина № 1, послужившая хорошим источником информации о геологическом строении района.

Основным результатом поисковых работ за период с 1951 по 1970 г. стало открытие крупных газовых и газоконденсатных месторождений в меловых и юрско-триасовых отложениях Восточно-Кубанской впадины, Иркиевской синклинали и Каневско-Березанского вала. Продуктивный комплекс для этих месторождений – нижнемеловой, залегающий на глубинах от 1500 до 2000 м. За достаточно короткий период времени с 1949 по 1959 г. было открыто целое направление для поисков месторождений в пределах Западного Предкавказья [2].

Как видно из истории открытия основных месторождений, наиболее подходящими для поисковых целей оказались методы гравиразведки и сейморазведки. Порядок поисков представляется следующим образом – на крупных поднятиях, фиксируемых по гравитационным максимумам, на основе сейморазведки МОВ выделялись локальные структуры и подготавливались к бурению. В дальнейшем по результатам проведения сейсмических работ МОВ в пределах Ейского полуострова было выделено несколько структур.

Отрицательные результаты бурения в пределах этих структур указывают на то, что в западном направлении в сторону Азовского моря происходит изменение закономерностей геологического строения. В этих условиях применяемый комплекс методов оказался неподходящим для постановки бурения.

*Третий этап* изучения Ейской площади начался с 1974 г., когда в практику исследований вошла сейморазведка методом общей глубинной точки (МОГТ) [3, 4]. С внедрением в 1973–1977 гг. МОГТ

прошла подготовка и передача в разведку новых поднятий по нижнемеловым отложениям (Южно-Ленинодарское, Южно-Платнировское, Новоленинодарское, Молодежное, Восточно-Крыловское, а также ряд объектов, требующих детализации).

*Четвертый этап.* С 2005 по 2011 г. на прилегающей с востока к Ейскому полуострову акватории (Таганрогский залив, Ясенский залив, косы Долгая и Камышеватская) были проведены поисковые и детальные сейсмические работы МОГТ с целью поисков газоперспективных объектов в нижнемеловых отложениях. В результате этой работы выявлено десять перспективных структур, из которых шесть подтверждены структурными построениями [5–7].

После проведенного авторами анализа геолого-геофизической изученности Ейской площади получено два основных результата. Во-первых, выделены основные факторы, повлиявшие на принятие ошибочного решения о бесперспективности Ейской площади:

- неравномерное исследование геологического строения площади как по времени, так и по плотности. На Ейском полуострове пробурено 53 скважины, большая часть которых (37 скважин) находится в районе трех площадей, занимающих не более четверти от общей площади полуострова. На остальных участках пробурены 1–2 скважины;
- отсутствие прецизионных исследований в пределах площади, основной объем буровых работ выполнялся в 50-е гг.;
- сейморазведочные работы МОГТ-2D имеют региональный характер.

Во-вторых, детальное рассмотрение применяемых методов на каждом из выделенных исторических этапов изучения Ейской площади и результатов, полученных на их основе, дало основание для выбора наиболее оптимального комплекса методов, состоящего из литофизического и сейсмогеологического моделирования, структурного анализа, сеймостратиграфического анализа с выделением сейсмофаций различного таксономического уровня и палеогеографического анализа обстановок осадконакопления.

Для оценки тектонической активности в целом по всем горизонтам на сейсмических разрезах авторами разработана методика совместной интерпретации толщины. На сейсмический разрез наносится цветом (в настоящей статье цвета обозначены буквами английского алфавита: А – зеленый; В – желтый; С – красный) значения толщины между горизонтами. Цвета распределяются следующим образом: красным отображены максимальные значения толщины, желтым – средние и зеленым – минимальные (рис. 3). Построение профилей осуществляется в два этапа.

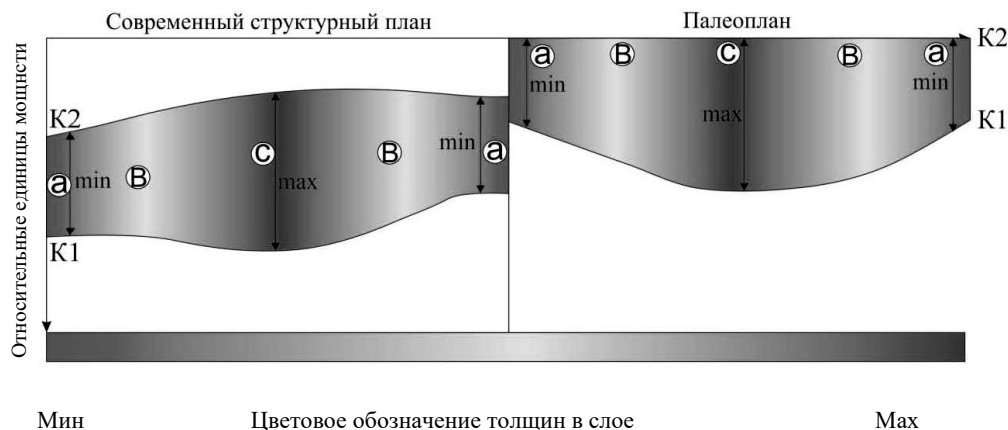


Рис. 3. Распределение толщин и соответствующих им цветов в слое

На первом этапе по каждому интервалу проводятся анализ значений толщин и их распределение. По результатам этого анализа каждый слой разделяется внутри на цвета, соответствующие толщине. Это позволяет расположить все интервалы на одном разрезе и в каждом из них выделить зоны с наибольшими и наименьшими скоростями осадконакопления без выравнивания.

На втором этапе для сравнения интенсивности изменения мощностей берутся разницы их значений для всех толщ, изображенных на разрезе. Вычисляется интервал с максимальными значениями

изменения толщины в пласте. Для толщины минимальным задается нулевое значение мощности, а разница между максимумом и минимумом показывает относительное изменение скорости осадконакопления (рис. 4). Эта процедура проводится для приведения минимальных значений мощностей каждого интервала на разрезе к единому нулевому уровню.

Такой подход позволяет сравнивать интенсивности вертикальных движений, а также проследить тренд распространения зон с увеличенными и уменьшенными мощностями.

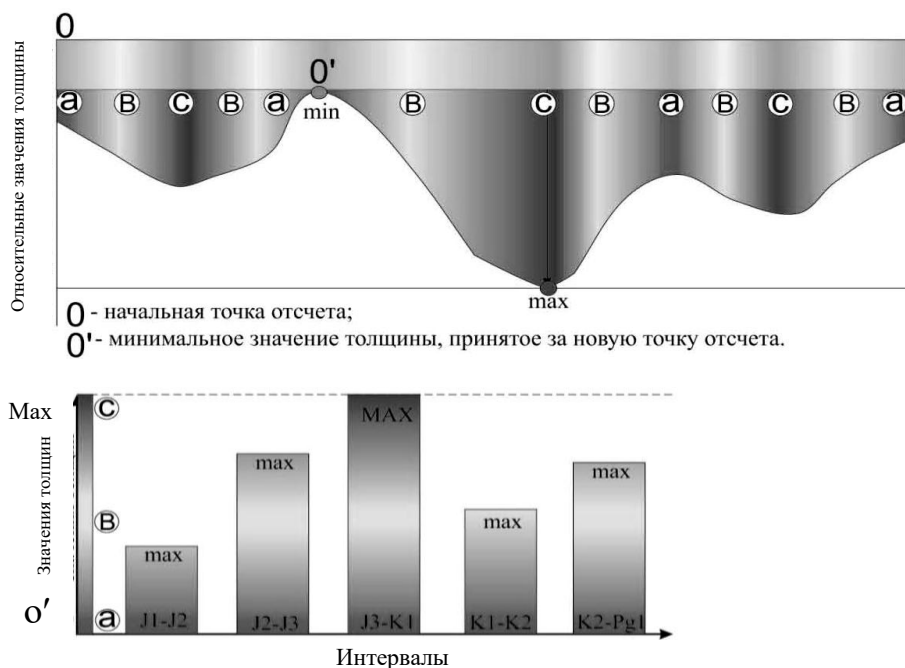


Рис. 4. Распределение значений и цветов для каждого интервала на втором этапе

Итоговый разброс значений для всех горизонтов задается от нуля до максимального изменения мощности, которое получилось в результате сравнения всех интер-

валов разреза. В результате получается обобщенный разрез, на котором видно распределение и изменение относительной толщины по всему разрезу (рис. 5).

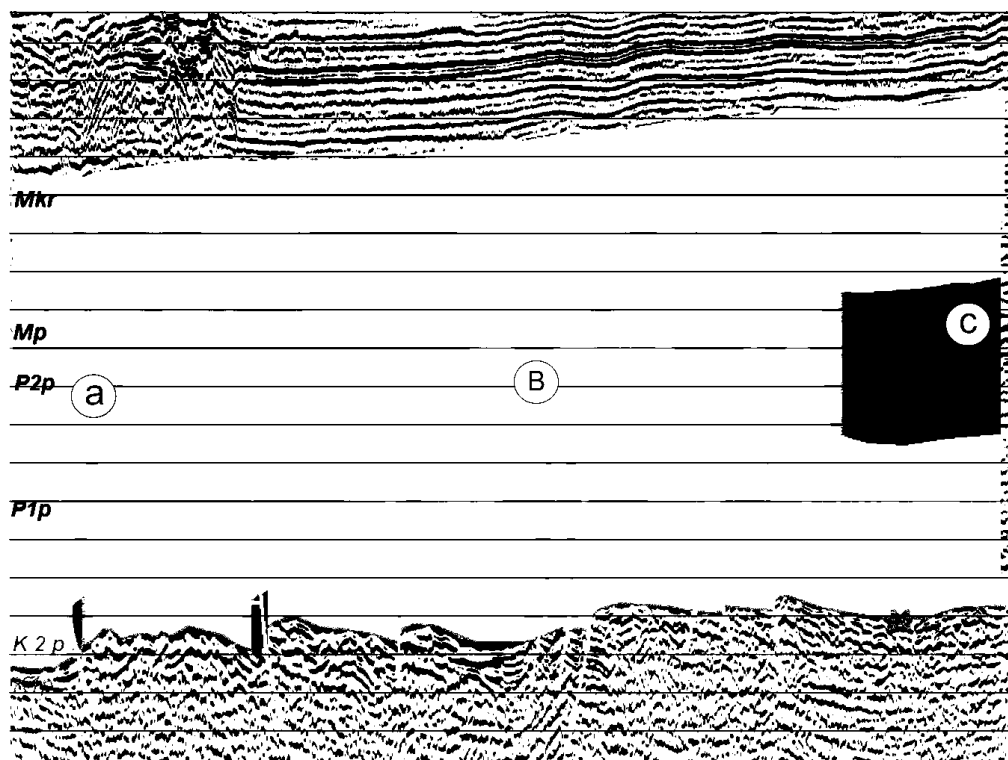


Рис. 5. Результирующий разрез

Такой подход позволяет проводить анализ изменения толщин на разрезе, выделять время образования зон с максимальными и минимальными темпами осадконакопления, инверсионные структуры.

Данный метод не требует выравнивания выделенных горизонтов, что дает возможность проследить историю формирования площади, сохраняя современное положение структур, через которые проходит профиль.

На профиле 1 отмечается следующая закономерность в распределении мощностей: максимальные мощности выделяются в нижнемеловых и нижнепалеогеновых отложениях, что свидетельствует о наличии зон активного погружения; от нижнемеловых к нижнепалеогеновым отложениям происходит смещение зоны погружения с юга на север, образуя единый тренд.

На профиле 2 распределение мощностей показывает, что активизация вертикальных движений происходила преимущественно в верхнем мелу и продолжалась вплоть до верхнепалеогенового времени, где отсутствуют резкие изменения мощностей.

С учетом полученных построений можно предположить, что наиболее активное формирование пликативных и дизъюнктивных структур произошло в этот период.

На профиле 3 выделяется два разнонаправленных тренда смещения зон повышенных значений мощностей. В первом случае наблюдается направленность с центра профиля на юг. Изменение связано с тем, что в верхнемеловое время вдоль разрывного нарушения погружалось северное крыло, а в нижнепалеогеновое – южное. Это привело к тому, что в современном плане амплитуда разрывного нарушения незначительна и его выделение было затруднительным, хотя прослеживается оно от нижнемеловых до верхнепалеогеновых отложений. Второй тренд показывает, что зона погружения, выделяемая в интервале верхнемеловых отложений, локализуется в нижнепалеогеновое время, а ее ось смещается в северном направлении.

Анализ мощностей по профилю 4 показал, что рост структур начался в нижнемеловое время и продолжался до верхнепалеогенового времени.

Прогибание, которое происходило в верхнемеловое время, имеет максимальное значение и региональный характер. Наибольшие мощности отмечаются в северной части профиля. В это же время образовалось разрывное нарушение, вдоль которого расположена крупная приразломная структура. В нижнепалеогеновое время наблюдается продолжение тренда к прогибанию, заложенного ранее. Значительные изменения происходят в верхнепалеогеновое время. В северной части профиля

продолжается прогибание, а в южной вертикальные движения меняют направление на противоположное. На 4-м профиле выделяется три тренда смещения. Первые два имеют противоположные направления и начинаются из центра профиля в нижнемеловых отложениях. Третий тренд начинается в нижнепалеогеновых отложениях и направлен с севера на юг. Это указывает на то, что формирование структур происходило в два этапа, которые характеризуются различными направлениями трендов погружения.

На разрезе по линии 5-го профиля в нижнемеловое время отмечаются небольшие изменения мощности. В это время начинают формироваться основные структуры, выделяемые в современном плане. Максимальная интенсивность вертикальных движений отмечается в верхнемеловое время, в этот период амплитуды Албашинской и Щербинской структур стали близки к современным, так как в последующем не отмечается значительных подвижек.

На профиле 6 отчетливо прослеживаются все стадии формирования Полевой структуры. Начало заложения структуры отмечается в немеловое время. В верхнемеловое время отмечается максимальная интенсивность вертикальных движений, за счет которых формируется свод структуры в ее южной части. Завершающая стадия формирования выделяется в нижнепалеогеновое время, когда Полевая структура принимает практически современные размеры. Тренды показывают, в каких направлениях происходило смещение зон погружения, которые оказали прямое влияние на современную форму структур в пределах 6-го профиля.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать несколько выводов.

Во-первых, анализ интенсивности вертикальных движений по всем профилям показал, что все структуры Ейской площади начали свое формирование в нижнемеловое время. Максимальное увеличение амплитуд структур и разрывных нарушений пришлось на верхнемеловое время. Это указывает на то, что на конец верхнего мела в пределах площади уже существовали довольно крупные структуры, способные улавливать и аккумулировать мигрировавшие в то время УВ.

Во-вторых, направления трендов, выделение которых стало возможным после использования предлагаемой авторами методики, показали изменение местоположения зон погружения. Это свидетельствует о серьезной структурной перестройке Ейской площади в изучаемом интервале времени. На конец нижнего мела существовал палеопрогиб субширотного простираения в южной части площади. С верхнемелового по настоящее время проис-

ходило смещение зон погружения по направлениям трендов, образование основных зон поднятий и изменение общего направления структур на субмеридиональное, которое подтверждается структурными построениями.

Применение разработанного авторами подхода с использованием методики совместной интерпретации толщин горизонтов для оценки тектонической активности позволило оценить историю формирования структур и площади в целом, установить ошибки прогноза газоносности территории и причины их возникновения, определить рациональный комплекс исследований для условий Ейской площади и перспективные участки для постановки ГРП.

### Литература

1. Системный подход в геологии: сб. науч. тр. АН СССР / отв. ред. А.Н. Дмитриевский, Ю.К. Бурлин, И.А. Володин. М., 1989. 221 с.
2. Пустильников М.Р. Перспективы нефтегазоносности северо-западного Предкавказья // Геология нефти. 1957. № 3. С. 12–17.
3. Шпак П.Ф., Витрик С.П., Глушко В.В. и др. Перспективы открытия крупных месторождений газа и нефти в акватории Азовского моря // Советская геология. 1971. № 9. С. 15–29.
4. Щербаков В.В., Беляев В.Н., Ефимов В.И. и др. Современная оценка нефтегазоносности Азовского моря по геофизическим данным: обзор. инф. М., 1983. Вып. 1. 59 с.
5. Самойленко Ю.Н., Самойленко И.Ю., Сианисян Э.С. Типы складчатых структур нефтегазопромысловых объектов северо-восточной части Азовского моря и Ейского полуострова // Геология, география и глобальная энергия. 2015. № 1. С. 50–63.
6. Самойленко Ю.Н. Перспективы газоносности северо-восточной части Азовского моря // Нефть и газ Юга России, Черного, Азовского и Каспийского морей – 2009: тез. докл. 6-й Междунар. конф. по проблеме нефтегазоносности Черного, Азовского и Каспийского морей. Геленджик, 25–29 мая 2009 г. Геленджик, 2009. С. 181–182.
7. Самойленко Ю.Н. Рекомендации ОАО «ЛУКОЙЛ» по выбору перспективных направлений геолого-разведочных работ на нефть и газ // Прогноз и разработка нефтегазоперспективных месторождений НК «ЛУКОЙЛ»: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Волгоград, 2014. С. 47–50.

### References

1. *Sistemnyi podkhod v geologii* [The systems approach in geology]. Proc. scientific. tr. USSR. Eds. A.N. Dmitrievskii, Yu.K. Burlin, I.A. Volodin. Moscow, 1989, 221 p.
2. Pustil'nikov M.R. Perspektivy neftegazonosnosti severozapadnogo Predkavkaz'ya [Prospects for oil and gas potential of North-Western Ciscaucasia]. *Geologiya nefiti*, 1957, no 3, pp. 12–17.

3. Shpak P.F., Vitrik S.P., Glushko V.V. i dr. Perspektivy otkrytiya krupnykh mestorozhdenii gaza i nefti v akvatorii Azovskogo morya [Prospects for the discovery of large oil and gas fields in the Sea of Azov]. *Sovetskaya geologiya*, 1971, no 9, pp. 15-29.
4. Shcherbakov V.V., Belyaev V.N., Efimov V.I. i dr. *Sovremennaya otsenka neftegazonosnosti Azovskogo morya po geofizicheskim dannym* [Modern evaluation of oil and gas potential of the Azov Sea by geophysical data]. Review. Moscow, 1983, vol. 1, 59 p.
5. Samoilenko Yu.N., Samoilenko I.Yu., Sianisyan E.S. Tipy skladchatykh struktur neftegazopiskovykh ob"ektov severo-vostochnoi chasti Azovskogo morya i Eiskogo poluostrova [Types of folded structures of oil and gas facilities north-eastern part of the Sea of Azov and Yeysk Peninsula]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2015, no 1, pp. 50-63.
6. Samoilenko Yu.N. [Prospects for gas-bearing north-eastern part of the Azov Sea]. *Nefi' i gaz Yuga Rossii, Chernogo, Azovskogo i Kaspiiskogo morei – 2009* [Oil and gas of the South of Russia, the Black, Azov and Caspian seas - 2009]. Mes. rep. 6th Intern. conf. on the issue of oil and gas potential of the Black, Azov and Caspian seas. Gelendzhik, May 25-29, 2009. Gelendzhik, 2009, pp. 181-182.
7. Samoilenko Yu.N. [Recommendations of OAO "LUKOIL" on the choice of perspective directions of exploration work for oil and gas]. *Prognoz i razrabotka neftegazoperspektivnykh mestorozhdenii NK "LUKOIL"* [Forecast and development of oil and gas deposits of NK "LUKOIL"]. Mes. rep. Intern. scientific and engineering. conf. Volgograd, 2014, pp. 47-50.

---

*Поступила в редакцию*

*10 марта 2016 г.*



УДК 550.385.3,550.343

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-87-90

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ВЕКТОРОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

© 2016 г. И.Л. Трофимов, Х.Д. Канониди

Трофимов Игорь Леонтьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, г. Москва, 123242, e-mail: trofimov@igemi.troitsk.ru

Trofimov Igor Leont'evich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya, 10, Moscow, 123242, e-mail: trofimov@igemi.troitsk.ru

Канониди Харлампий Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором магнитно-ионосферных взаимодействий, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калужское шоссе, 4, г. Троицк, г. Москва, 142190, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Kanonidi Kharlampii Dmitrievich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Head of Sector of Magnetic-Ionospheric Interactions, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaluzhskoe Highway, 4, Troitsk, Moscow, 142190, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

В рамках круга идей методологии data mining предложено использовать осреднённые по длинным временным рядам геомагнитных вариаций параметры регрессионной модели, связывающей вертикальную и горизонтальные составляющие вектора вариаций. Новизной подхода является описание регрессии в виде четырёх параметров комплексного вектора, соответствующего коэффициентам регрессии. Приведены в виде графиков результаты расчётов для семи обсерваторий мировой сети.

**Ключевые слова:** комплексный вектор, магнитная обсерватория, геомагнитные вариации, временные ряды.

Averaged along long-term temporal rows of geomagnetic variations, parameters of the regression model, which connects vertical and horizontal components of the vector of variations, were suggested to utilize in frames of «data mining» methodology ideas. The novelty of the approach is the description of the regression as four parameters of a complex vector corresponding to regression coefficients. The computational results are presented for seven observatories of the world-wide net.

**Keywords:** complete vector, magnetic observatory, geomagnetic variation, times row.

В настоящее время в мировых центрах данных собран обширный материал наблюдений вариаций геомагнитного поля в электронном виде. Он непрерывно пополняется и находится в свободном доступе в Интернете. В распоряжении научного сообщества имеется вычислительная техника, доступная практически каждому исследователю, что даёт возможность изучать большие массивы данных с точки зрения их внутреннего устройства на основе некоторой модели. В связи с этим появилось много различных вычислительных алгоритмов, получивших за рубежом обобщённое название data mining. Применение на практике таких алгоритмов позволяет уточнить результаты эпохи ручных вычислений и обосновывать новые научные задачи. В связи с этим мы предлагаем ввести в практику изучения геомагнитных вариаций модель модулированной квазигармоники, описываемой в терминах параметров комплексного вектора.

Многолетняя практика изучения морфологии геомагнитных вариаций позволяет утверждать, что весь частотно-временной диапазон регулярных вариаций может быть представлен для каждого морфологического типа временной зависимостью, описываемой формулой

$$f(t) = a(t) \cdot \cos \omega t + b(t) \cdot \sin \omega t = A(t) \cdot \cos[\omega t + \phi(t)]. \quad (1)$$

Частота в (1) может считаться известной, так как существующая классификация типов вариаций построена на разделении их по частоте  $f(t) = 2\pi/T$ , где  $T$  – период вариации. Коэффициенты  $a(t)$ ,  $b(t)$  описывают огибающую вариации. Фактически в самом общем смысле исследование пространственно-временных зависимостей в различных задачах геомагнетизма связано с анализом огибающих в (1). Во многих случаях определяемые при этом параметры зависят от поляризации вариаций, которая может меняться во времени и пространстве. Мы предлагаем ал-

горитм описания вариаций, связанный с их поляризацией.

В основе алгоритма лежит математическое определение комплексного вектора. В [1–3] приводятся свойства этих векторов и их практическое применение. В [4, 5] эти результаты получили дальнейшее использование. На основе [1, 3] найдено следующее общее выражение для комплексного вектора:

$$\mathbf{A}(X, Y, Z) = X \cdot \mathbf{i} + Y \cdot \mathbf{j} + Z \cdot \mathbf{k} = \text{re}\mathbf{A} + i \cdot \text{im}\mathbf{A} = (a - i \cdot b) \cdot \exp(i \cdot \theta). \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } \text{re}\mathbf{A} &= \text{re}X \cdot \mathbf{i} + \text{re}Y \cdot \mathbf{j} + \text{re}Z \cdot \mathbf{k}; \\ \text{im}\mathbf{A} &= \text{im}X \cdot \mathbf{i} + \text{im}Y \cdot \mathbf{j} + \text{im}Z \cdot \mathbf{k}. \end{aligned}$$

При умножении (2) на  $\exp(i\omega t)$  получается описание гармонически изменяющегося радиус-вектора, годографом которого является эллипс – эллипс поляризации (ЭП), у которого  $a, b$  – большая и малая полуоси;  $\theta$  – фазовый угол. Далее везде используется прямоугольная правая декартова система координат. Как принято в геофизике, ось  $x$  направлена по астрономическому (или магнитному) меридиану;  $y$  – вправо по часовой стрелке;  $z$  – внутрь Земли. Формулы (1)–(2) записаны в этой системе координат, что следует учитывать при вычислениях. Подчеркнём, что (2) можно применять для любого вектора с комплексными компонентами. На основании (2) будем рассматривать комплекснозначный вектор, компоненты которого изменяются во времени по закону (1)

$$\mathbf{F}(t) = \text{re}\mathbf{F}(t) + i \cdot \text{im}\mathbf{F}(t) = [a(t) - i \cdot b(t)] \cdot \exp(i\omega t). \quad (3)$$

Здесь  $\text{re}\mathbf{F}(t)$  – наблюдаемый вектор вариации;  $\text{im}\mathbf{F}(t)$  получен из него преобразованием Гильберта или просто сдвигом на четверть периода. Эта операция аналогична восстановлению квадратурной части простого гармонического сигнала. Выражение (3) описывает комплекснозначный амплитудно-модулированный вектор как последовательность мгновенных ЭП.

Мы будем изучать временные ряды (3) при помощи линейной регрессии между компонентами  $\mathbf{F}(t)$

$$Z(t) = M \cdot X(t) + N \cdot Y(t). \quad (4)$$

Ниже мы покажем, что эта регрессия содержит информацию, которую сложно обнаружить, вычисляя только параметры ЭП. В работе [4] при помощи расчётов (4) был изучен геоэлектрический разрез Северного Ледовитого океана. При этом использовались гармоники солнечно-суточной вариации временных рядов длиной не более пяти суток. Цель данной работы – применение регрессии (4) для описания годовых рядов геомагнитных вариаций магнитных обсерваторий в диапазоне периодов до 27-дневного.

Коэффициенты выражения (4) вычисляются точно для двух неравных отсчётов компонент

в разные моменты времени. При этом погрешность определения  $M, N$  очень велика при современной точности измерения вариаций. Тем не менее (4) может служить теоретической основой для разработки алгоритмов и программ для вычисления  $M, N$  методом наименьших квадратов. С этой целью был создан в среде MatLab пакет программ, который вместе с обслуживающими подпрограммами позволяет вести расчёты с данными, представленными в форматах мировых центров данных с любым постоянным шагом оцифровки. Для построения рядов (3) производилась фильтрация исходных временных рядов узкополосным фильтром для заданного набора расчётных периодов. Применялись различные фильтры из стандартной библиотеки программ MatLab. Коэффициенты (4) вычислялись методом наименьших квадратов в скользящих по длине обрабатываемого ряда окнах заданной длины. Найденный для этих окон массив коэффициентов осреднялся и для среднего двумерного комплексного вектора  $\mathbf{P}(M, N)$  вычислялись большая и малая полуоси  $m, n$ ,  $\alpha$  – угол  $m$  с осью  $x$ ;  $\psi$  – фазовый угол. Применялись выражения [1–3]

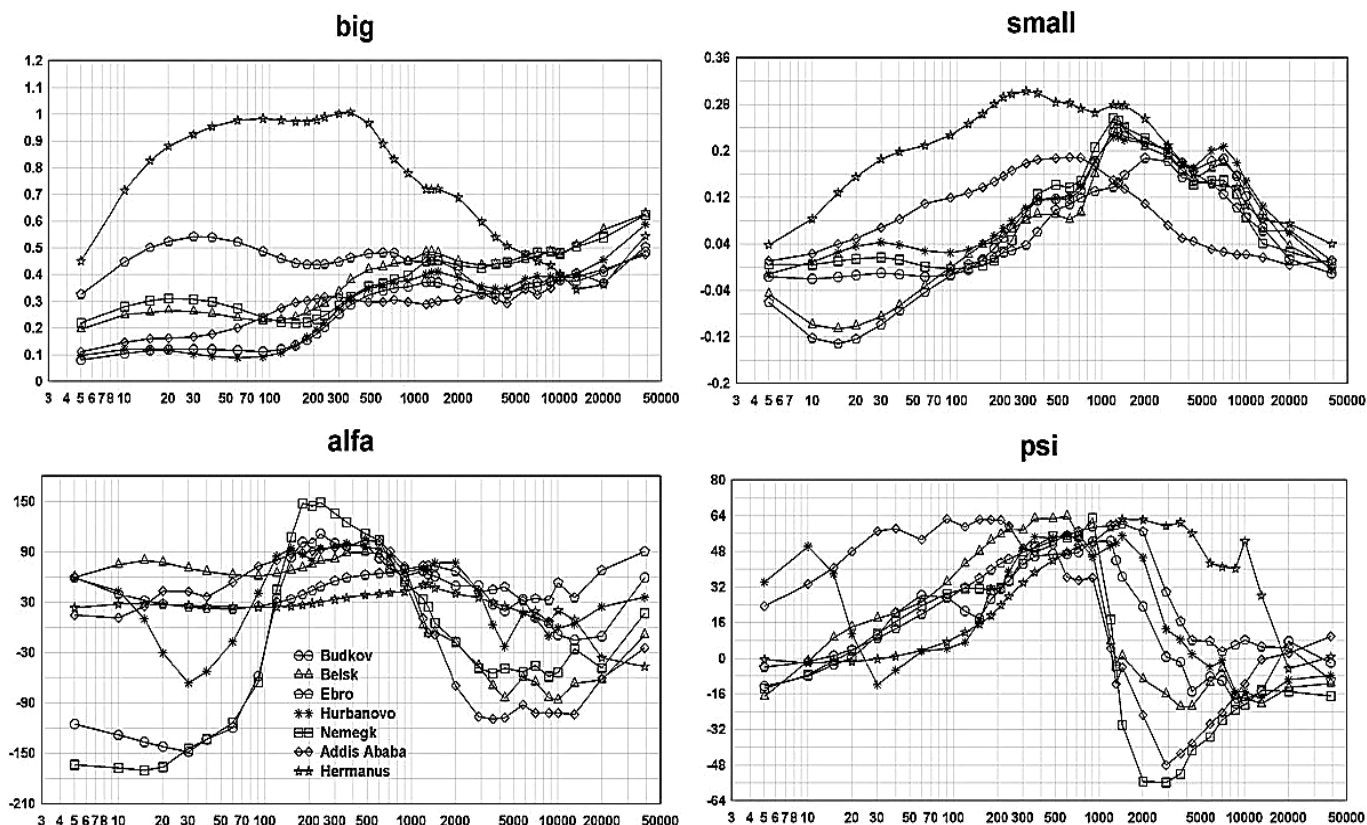
$$M + iN = (m + n) \cdot \exp(\psi + \alpha),$$

$$M - iN = (m - n) \cdot \exp(\psi - \alpha).$$

Расчёты проведены для семи обсерваторий мировой сети. Пять из них расположены в Европе, две – в Африке. В обработку были взяты данные за 2012 г. в виде массивов из 12 месячных файлов с оцифровкой одна минута. Вычисления проводились для каждого месяца и затем результаты осреднялись, т.е. конечные параметры относятся к ряду длиной в один год. На рисунке показаны графики параметров  $m(\text{big}), n(\text{small}), a(\text{alfa}), \psi(\text{psi})$ . Каждая точка на графике является вычисленной величиной. Соответствующие периоды в минутах нанесены по оси абсцисс в логарифмическом масштабе в диапазоне 5–38800 (27-дневный период) минут. По оси ординат масштаб равномерный. Углы представлены в градусах, полуоси – в безразмерных величинах.

Теперь рассмотрим интерпретацию параметров. Полученные осреднением на множестве мгновенных ЭП коэффициенты  $M, N$  позволяют для любого из этих ЭП с составляющими  $X_i, Y_i$  рассчитать некоторое «характерное» среднее значение вертикальной составляющей  $Z_m = M \cdot X_i + N \cdot Y_i$ . Двумерный вектор  $\mathbf{H}(X_i, Y_i)$  является проекцией трёхмерного вектора  $(X_i, Y_i, Z_i)$  на плоскость  $xy$ . Согласно [1–3],  $Z_m$  является скалярным произведением

$$Z_m = (\mathbf{P}, \mathbf{H}) = m \cdot a \cdot [(1 - n \cdot b / m \cdot a) \cdot \cos \theta + i \cdot (n / m - b / a) \cdot \sin \theta] \cdot \exp(\phi + \psi).$$

Графики параметров  $m(big)$ ,  $n(small)$ ,  $\alpha(alfa)$ ,  $\psi(psi)$ 

Здесь  $a$ ,  $b$  – полуоси;  $\varphi$  – фазовый угол  $\mathbf{H}$ ;  $\theta = \beta - \alpha$ , где  $\beta$  – угол  $a$  с осью  $x$ . Из этого выражения следует, что при  $\theta = 0$  и  $n/m = -b/a$  величина  $|Z_m/a|$  достигает максимальной величины; при  $\theta = \pi/2$  и  $n/m = b/a$  имеем  $Z_m = 0$ .

При линейной поляризации  $\mathbf{H}$  полуось  $b = 0$ , и для этих же значений  $\theta$  имеем  $|Z_m/a| = m$  и  $|Z_n/a| = n$ . Эти свойства  $Z_m$  могут служить для сравнения поведения вариаций на разных обсерваториях. Так, на рисунке наблюдается сложное поведение параметров  $P$  даже на близко расположенных обсерваториях в Европе. По параметру  $big$  обсерватория Эбро существенно отличается от остальных. Наибольшие значения  $big$  наблюдаются для обсерватории Германус. Скорее всего, это связано с влиянием океана. По параметру  $small$  явно выделяются обсерватории Германус и Аддис-Абеба. Более подробный анализ требует учёта геологических структур в районе обсерваторий, что не являлось целью данной работы. Подводя итог вышеизложенному, можно заключить, что содержание проделанной нами работы обнаруживает перспективность предложенного

метода исследования временных рядов на обсерваториях мировой сети. Заметим, что описание поляризации вариаций с помощью модели модулированной гармонике обладает преимуществом наглядности и простоты программной реализации по сравнению с методикой спектрально-корреляционного анализа.

#### Литература

1. Трофимов И.Л., Шнеер В.С. Опыт определения индукционных векторов по наблюдениям с дрейфующего льда в Северном Ледовитом океане // Тезисы Второй Всерос. школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли. М., 2005. С. 105–106.
2. Трофимов И.Л., Шнеер В.С. Некоторые результаты определения магнитного индукционного вектора в Центральной Арктике // Геофизические исследования. 2007. № 8. С. 69–74.
3. Трофимов И.Л., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., Орехова Д.А., Попова И.В., Шнеер В.С., Щорс Ю.Г. Некоторые черты строения центральной части Северного Ледовитого океана по результатам моделирования магнитовариационных данных с учётом эквивалентного источника // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 3. С. 50–70.

4. Wanliss J.A., Shiokawa K., Yumoto K. Latitudinal variation of stochastic properties of the geomagnetic field // *Nonlin. Processes Geophys.* 2014. Vol. 21. P. 347–356.
5. Hall C.M. Complexity signatures in the geomagnetic H component recorded by the Tromso magnetometer (70 N, 19 E) over the last quarter of a century // *Nonlin. Processes Geophys.* 2014. Vol. 21. P. 1051–1058.

#### References

1. Trofimov I.L., Shneer V.S. [Experience the definition of induction vectors according to the observations from drifting ice in the Arctic Ocean]. *Tezisy II Vseros. shkoly-seminara po elektromagnitnym zondirovaniyam Zemli* [Abstracts of II All-Russian school-seminar on electromagnetic sounding of the Earth]. Moscow, 2005, pp. 105-106.
2. Trofimov I.L., Shneer V.S. Nekotorye rezultaty opredeleniya magnitnogo induktsionnogo vektora v Tsentral'noi Arktike [Some results of the determination of

- the magnetic induction vector in the Central Arctic]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2007, no 8, pp. 69-74.
3. Trofimov I.L., Zhdanov M.S., Korotaev S.M., Kruglyakov M.S., Orekhova D.A., Popova I.V., Shneer V.S., Shchors Yu.G. Nekotorye cherty stroeniya tsentral'noi chasti Severnogo Ledovitogo okeana po rezultatam modelirovaniya magnitovariatsionnykh dannykh s uchedom ekvivalentnogo istochnika [Some features of the central part of the Arctic Ocean as a result of the structure of simulation magnetovariational data taking into account the equivalent source]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2014, vol. 15, no 3, pp. 50-70.
4. Wanliss J.A., Shiokawa K., Yumoto K. Latitudinal variation of stochastic properties of the geomagnetic field. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2014, vol. 21, pp. 347-356.
5. Hall C.M. Complexity signatures in the geomagnetic H component recorded by the Tromso magnetometer (70 N, 19 E) over the last quarter of a century. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2014, vol. 21, pp. 1051-1058.

УДК 504.4.054

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-91-99

## ЖЕЛЕЗО В ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ БАССЕЙНА АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2016 г. Ю.А. Федоров, И.В. Доценко, Л.Ю. Дмитрик

Федоров Юрий Александрович – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Доценко Ирина Владимировна – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: irinageo@mail.ru

Дмитрик Леонид Юрьевич – аспирант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: dimikarmy13@inbox.ru

Fedorov Yurii Aleksandrovich – Doctor of Geographical Science, Professor, Main Researcher, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Environment, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Dotsenko Irina Vladimirovna – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irinageo@mail.ru

Dmitrik Leonid Yurievich – Post-Graduate Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: dimikarmy13@inbox.ru

На основании анализа литературных данных и материалов собственных натурных исследований представлены уровни содержания железа, формы его нахождения и миграции, значения pH и Eh в системе «шахтные воды – пруды-отстойники – малые реки районов угледобычи – река Дон – Таганрогский залив – Азовское море». Рассчитана регрессионная модель, описывающая связь между водородным показателем и содержанием сульфатных ионов. Выявлены геохимические барьеры и установлены значения pH и Eh, при которых происходит интенсивное осаждение гидроокислов железа. Описаны механизмы поведения железа в разных типах вод, подробно рассмотрены процессы его окисления в различных условиях, а также изменение форм нахождения этого элемента. Объясняются экстремально высокие содержания железа общего в поверхностных водах района угледобычи и повышенные в речных, эстуарных и морских водах тем, что оно находится в них в коллоидном состоянии в виде комплексов с органическим и минеральным веществом.

**Ключевые слова:** железо, шахтные воды, речные воды, морские воды, геохимический барьер, сульфаты.

Levels of the content of Fe and pH in the water of system "The mine waters – the river – the sea" on example of East Donbass territory are presented on the basis of the literary data analysis and materials of own researches. The regression model which describes the relationship between the pH value and the sulfate ions content was calculated. Geochemical barriers and the pH value, at which the intense precipitation of iron hydroxides is identified. The mechanisms of iron behavior in different types of water are described. The processes of oxidation in different conditions are considered in detail, as well as variation in the modes of element occurrence. Extremely high content of total iron in surface water area of coal mining and its increasing in river, estuarine and marine waters was discovered. The authors explain this situation with the fact that the total iron is in this waterbodies has the colloidal form complexes with organic and mineral substance.

**Keywords:** iron, mine waters, river waters, sea waters, geochemical barrier, sulfates.

Железо – один из самых распространенных элементов в природе, оно составляет примерно 4–5 % от всей массы земной коры. В результате химического выветривания горных пород железо поступает в природные воды, в которых оно прибывает в трех миграционных формах: растворенной, коллоидной и взвешенной. Растворенное железо находится в воде в ионной форме ( $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ ), в виде гидроксокомплексов ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и др.) и комплексных соединений с мине-

ральными и органическими веществами вод. Этот элемент, помимо растворенной и взвешенной форм миграции, может присутствовать в следующих состояниях: коллоиды и псевдоколлоиды, простые и комплексные ионы с положительным зарядом и комплексные ионы, несущие отрицательный заряд, а также нейтральные комплексные молекулы. Железо играет важную физиологическую и биохимическую роль в живых организмах. Оно входит в состав молекул порфиринов и бел-

ков, которые переносят кислород, катализирует процесс синтеза хлорофилла, участвует в биохимических окислительно-восстановительных реакциях. В этой связи железо нередко включают в состав биогенных элементов природных вод. С другой стороны, высокие концентрации этого элемента могут оказывать токсическое воздействие на организмы. В этой связи железо относится к приоритетным показателям качества воды, концентрации которого контролируются в обязательном порядке в рамках национального мониторинга поверхностных вод суши. Значительные количества железа поступают в водные объекты с подземным и поверхностным стоком, с производственными, в том числе шахтными, и сельскохозяйственными сточными водами. Шахтные воды, поступающие при вскрытии угольных пластов с большим содержанием пирита, часто являются кислыми и имеют высокие уровни содержания сульфат-иона (в том числе свободной серной кислоты) [1–3], железа и других металлов. Обычно эти воды характеризуются механическим и бактериальным загрязнением, а также высокой минерализацией. Кроме того, они обладают повышенными коррозионными свойствами, повреждая металлические и железобетонные конструкции.

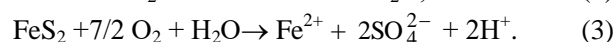
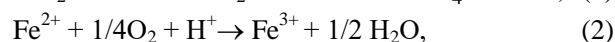
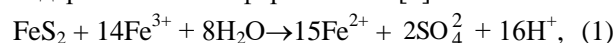
### Материалы и методы

В работе приведены обширные сведения по уровням содержания растворенного железа и формам его нахождения, а также значениям pH и Eh, полученные ранее авторами для пластовых подземных, шахтных, речных и морских вод бассейна Азовского моря. Для обозначения суммарной концентрации всех растворенных форм нахождения железа в воде мы использовали термин «железо общее». Термин «валовое содержание», или «валовая концентрация», применяют тогда, когда говорят о суммарном содержании в воде как растворенных, так и взвешенных форм железа. Методики определения содержания растворенного железа и физико-химических характеристик приведены в [4–6].

### Результаты и обсуждение

Шахтные воды угольных месторождений Восточного Донбасса являются одним из важных поставщиков окислов и гидроокислов железа в поверхностные воды суши. В работе [1] с использованием изотопного состава серы пиритов, серы и кислорода сульфатных ионов и гидрохимических

показателей доказано, что высокие концентрации железа в шахтных водах образовались вследствие бактериального (бактериями вида *Thiobacillus ferrooxidans*) и химического окисления сульфидов железа, а сами шахтные воды являются результатом смешения «фоновых» пластовых вод с проникающими в горные выработки атмосферными осадками и поровыми водами углей и вмещающих отложений. Taylor et al. [7] предложили три реакции окисления  $\text{FeS}_2$  в горных выработках. Образующиеся шахтные воды содержат ионы двух- и трехвалентного железа. Это подтверждается нашими данными, указывающими на примерно равное содержание обеих форм железа [8].



Фоновые подземные воды характеризуются широким диапазоном минерализации (таблица) – от солоноватых до рассолов по классификации [9]. Это подземные флюиды, на которые практически не оказала влияние деятельность человека. Пробы воды были отобраны при проходке и эксплуатации горных выработок из кровли и подошвы вмещающих пород и буровых скважин. В выборку вошли данные как по пластовым водам зоны активного водообмена, так и по рассолам зоны замедленного. pH воды изменяется от слабокислой до щелочной, преимущественно слабощелочной. Они характеризуются преобладающим содержанием двухвалентного железа. В них присутствуют в основном гетеротрофные анаэробы.

Шахтные воды характеризуются очень высоким содержанием железа и низкими значениями pH. В шахтных водах, водах терриконов и обогатительных фабрик, а также в водах прудов-отстойников и аэраторов доминирующими микроорганизмами являются железобактерии *Thiobacillus ferrooxidans*, которые принимают активное участие в окислении разных форм нахождения железа [1–3]. В водах малых рек региона, реке Дон, Таганрогском заливе и собственно Азовском море преобладают микроорганизмы видов *Siderocapsa treubii*, *Blastocaulis planctonica*, *Metallogenium personatum* и др. (таблица).

Содержание общего железа в шахтных водах Восточного Донбасса колеблется от 0,3 до 610 мг/дм<sup>3</sup>, в среднем – 40,38. Наиболее распространены (86,72 %) содержания железа в интервале 0,0–50 мг/дм<sup>3</sup>. Частота встречаемости содержания общего в интервале 50–100 мг/дм<sup>3</sup> равна 3,9 %, а в остальных не превышает показателя 2,34 %.

**Физико-химическая, микробиологическая характеристика шахтных и подземных вод  
Восточного Донбасса и содержание в них форм нахождения железа**

Тип вод	M, г/дм <sup>3</sup>	pH	Eh, мВ	Содержание железа, мг/дм <sup>3</sup>			Доминирующие микроорганизмы
				Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Fe общ.	
Фоновые подземные воды	2,4–79,0	6,3–9,0	+60,0–+200,0 (+120,0)	0,08–1,9	0,001–0,05	0,1–2,0	Гетеротрофные анаэробы
Шахтные воды Восточного Донбасса	1,2–17,4	2–8,3	+200,0–+500,0 (+450,0)	0,1–350	0,2–425,7	0,3–610	Thiobacillus ferrooxidans, Leptospirillum ferrooxidans
Вода терриконов и обогатительных фабрик	5,8–6,0	5,5–6,1	+210,0–+495,0 (+440,0)	7,5–9,0	11,0–14,0	18,0–22,0	Thiobacillus ferrooxidans, Thiobacillus tiooxidans, Thiobacillus thioparus
Пруды-отстойники, аэраторы	2,5–8,5	4,5–8,2	+50,0–+250,0 (+130,0)	0,01–11,8	0,36–33,2	0,36–45,0	Thiobacillus ferrooxidans, Thiobacillus tiooxidans, Thiobacillus thioparus
Малые реки Восточного Донбасса (р. Грушевка, Кадамовка, Атюхта, Аюта и др.)	0,44–5	6,5–8,9	+90,0–+210,0 (+185,0)	0,034–1,63	0,37–4,53	0,3–6,2	Siderocapsa treubii, Blastocaulis planctonica, Metallogenium personatum, Gallionella ferroginea, Ochrobium tectum, Caulococcus manganifera, Siderococcus limoniticus
Реки Дон, Тузлов, Большая Крепкая и др.	0,5–0,65	7–8,9	+110,0–+350,0 (+310,0)	0,008–0,29	0,012–0,4	0,02–0,69	То же
Таганрогский залив	0,8–10,0	7,35–9,23	+162,0–+262,0 (+156,0)	0,007–0,059	0,019–0,45	0,03–0,58	То же
Собственно Азовское море	7,5–16,5	8,13–8,6	+60,0–+350,0 (+122,0)	0,004–0,044	0,009–0,18	0,017–0,21	То же
Азовское море в целом	0,8–16,5	7,35–8,23	+60,0–+350,0 (+143,0)	0,004–0,059	0,009–0,45	0,017–0,58	То же

В связи с высоким содержанием и большой вероятностью попадания соединений железа в водные объекты, а также управлением процесса аэрации и осаждения в прудах-аэраторах было важно знать, при каких значениях pH произойдет резкое

снижение его растворенных форм. Был построен график (рис. 1), на котором представлена зависимость между общими содержаниями железа, выраженного в логарифмическом масштабе, и значениями pH.

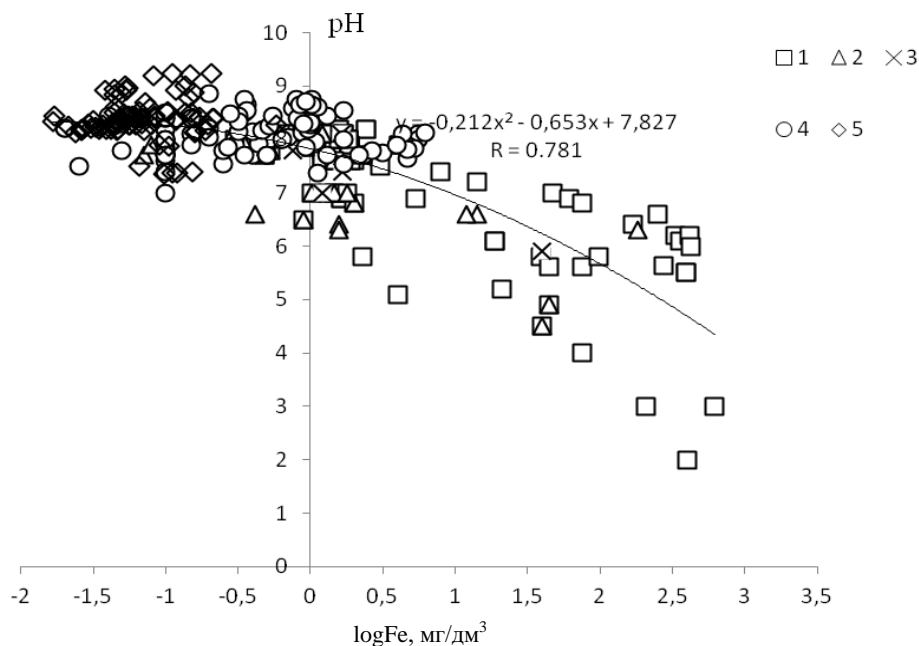


Рис. 1. Поведение содержания растворенного железа общего и значений pH: 1 – шахтные воды; 2 – подземные воды и рассолы; 3 – пруды-отстойники и аэраторы; 4 – реки; 5 – Азовское море

Отмечена высокая теснота связи между этими параметрами, а также параболический вид кривой, указывающий на то, что при повышении значений рН происходит образование твердой фазы. Максимальными содержаниями характеризуются шахтные воды со значениями рН от 2 до 6 единиц. В интервале от 6,5–8,5 происходит перегиб кривой, указывающий на интенсификацию окисления  $\text{Fe}^{+2}$  и гидролиз  $\text{Fe}^{+3}$ , с образованием слабо растворимой гидроокиси железа ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) и её осаждение. Следовательно, этот интервал является нижним пределом значений рН, при котором удаление железа из шахтных вод Восточного Донбасса приобретает лавинообразный характер, что указывает на наличие физико-химического барьера.

Шахтные воды оказывают влияние на подземные и поверхностные воды, что приводит не толь-

ко к возрастанию содержания общего железа, но и повышению содержания сульфатных ионов. Это хорошо видно на рис. 2, построенном с привлечением данных из работ [1, 10]. Подземные воды характеризуются широкими вариациями значений рН от 2 до 10. В целом для региона отмечается обратная гиперболическая зависимость между водородным показателем и содержанием сульфатов. Возрастание концентрации сульфатов сопровождается снижением величины рН. На графике видно, что наиболее высокими показателями содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  и низкими значениями рН характеризуются подземные воды Гуково-Зверевского, Белокалитвинского и Шахтинско-Несветаевского районов, т.е. те регионы, где наиболее развита горная промышленность.

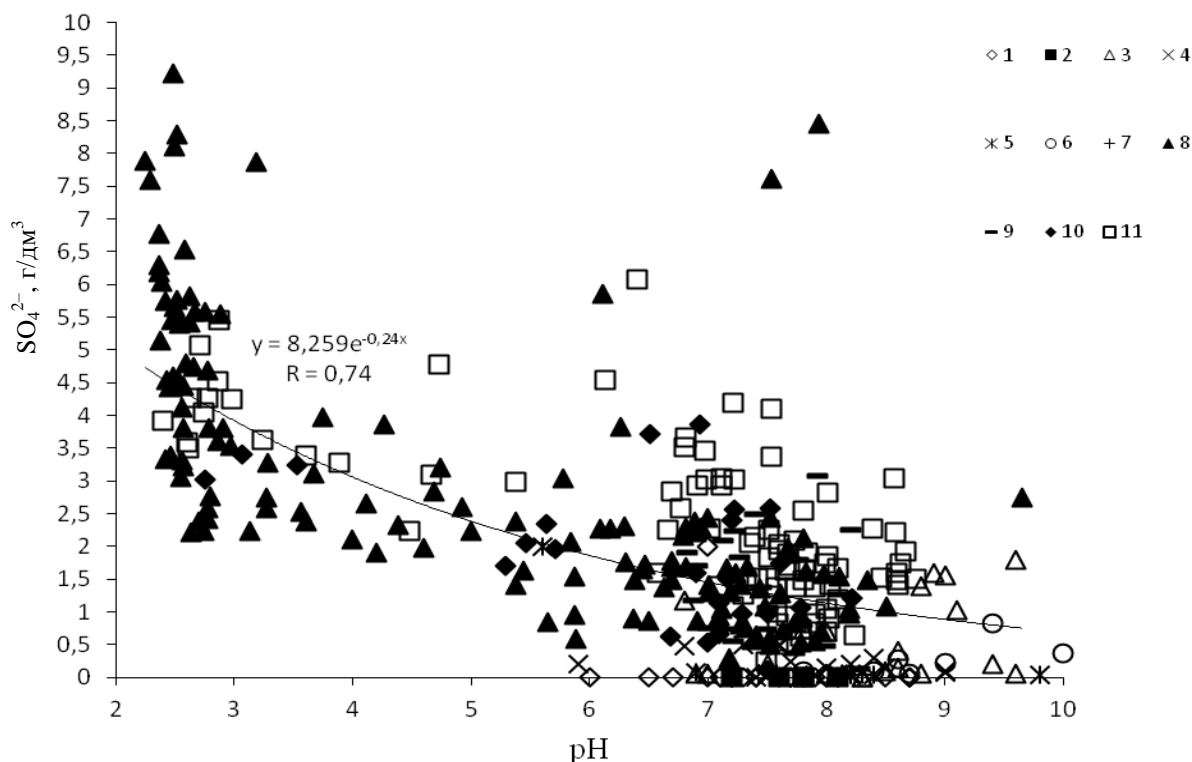


Рис. 2. Зависимость между концентрацией сульфат-иона и значением рН (по [1] с добавлениями): 1 – грунтовые воды (г. Ростов н/Д); 2 – родники (г. Ростов н/Д); подземные воды: 3 – Азово-Кубанский артезианский бассейн (АБ); 4 – Восточно-Донецкий АБ; 5 – Донецко-Донской АБ; 6 – Ергенинский АБ; 7 – Приволжско-Хоперский АБ; 8 – Гуково-Зверевский район; 9 – Каменско-Гундоровский район; 10 – Белокалитвинский район; 11 – Шахтинско-Несветаевский район

В системе «шахтные воды – пруды-отстойники – малые реки районов угледобычи – река Дон – Таганрогский залив – Азовское море» общие и средние содержания железа изменялись следующим образом: в прудах-отстойниках зафиксированы значения  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  – от 0,36 до 44,75 мг/дм<sup>3</sup>, 91,9 % значений не превышают 5 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Fe}_{\text{ср}} = 4,65$ . В малых реках районов угледобычи содержание  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  колеблется от 0,02 до 6,2 мг/дм<sup>3</sup>, 54,4 и 24 % всех значений приходятся на интервалы 0–5 и

5–10 мг/дм<sup>3</sup> соответственно,  $\text{Fe}_{\text{ср}} = 1,01$  мг/дм<sup>3</sup>. В р. Дон значения  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  изменялись от 0,1 до 0,69 мг/дм<sup>3</sup>, 71,4 % показателей находятся в интервале 0–0,05 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Fe}_{\text{ср}} = 0,47$  мг/дм<sup>3</sup>. В Таганрогском заливе  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  колеблется от 0,03 до 0,58 мг/дм<sup>3</sup>, 19,2 % значений в интервале 0–0,05 мг/дм<sup>3</sup>, 34,6 % – в интервале 0,05–0,1 мг/дм<sup>3</sup>, 25 % – в интервале 0,1–0,15 мг/дм<sup>3</sup>, и 15,4 % приходится на интервал 0,15–0,2 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Fe}_{\text{ср}} = 0,11$  мг/дм<sup>3</sup>. Значения  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  в Азовском море изменялись от 0,017 до



0,21 мг/дм<sup>3</sup>, 64,7 и 26,5 % значений находятся в интервалах 0–0,05 и 0,05–0,1 мг/дм<sup>3</sup> соответственно,  $Fe_{cp} = 0,05$  мг/дм<sup>3</sup>.

На рис. 3 были нанесены средние значения содержания общего железа и водородного показателя и выделены геохимические барьеры, на которых происходит осаждение гидроокислов железа,

способствуя самоочищению водной среды. Контрастнее всего выделяется барьер на участке шахтные воды → малые реки, отчетливо видны барьеры на участках малые реки → р. Дон и р. Дон → Таганрогский залив, и менее резко выделен барьер на участке Таганрогский залив → Азовское море.

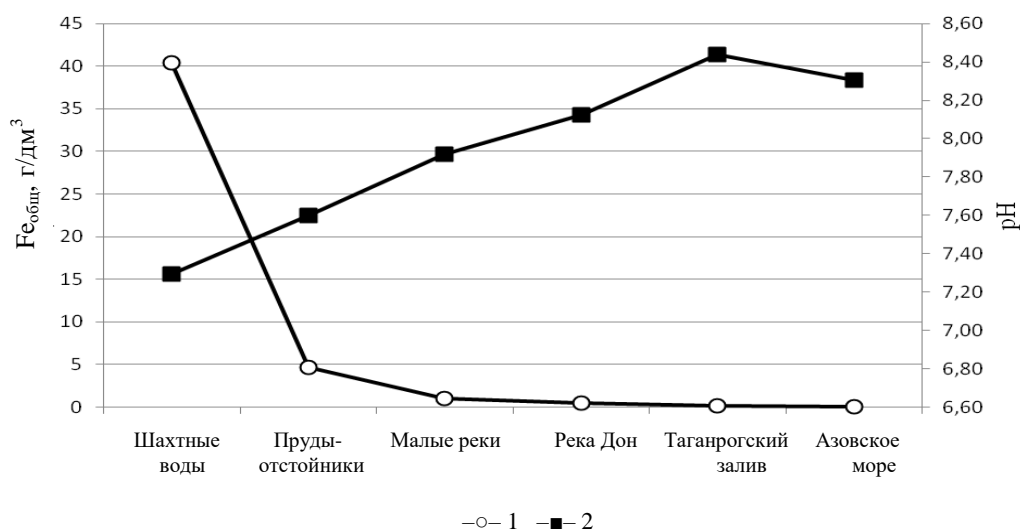


Рис. 3. Средние уровни содержания  $Fe_{общ}$  и значений pH в системе «шахтные воды – пруды-отстойники – малые реки район угледобычи – река Дон – Таганрогский залив – Азовское море»: 1 – средние значения общего железа; 2 – средние значения pH

Интересные результаты получены при изучении окислительно-восстановительного потенциала подземных природных и шахтных вод, а также вод терриконов, прудов-отстойников, малых рек и Азовского моря (таблица). Значения Eh фоновых пластовых оказались существенно ниже, чем шахтных вод и вод обогатительных фабрик и терриконов. Это подтверждает, что образование высоких концентраций железа происходит в шахтных водах и водах терриконов и обогатительных фабрик вследствие бактериального и химического окисления пирита как кислородом воздуха, так и воды. При этом преимущество имеет процесс бактериального окисления. Ю.А. Федоров [1] с использованием данных по изотопному составу серы и кислорода сульфатных ионов рассчитал, что при их образовании в шахтных водах участвовало от 5 до 50 % молекулярного кислорода. Такой разброс данных по шахтным водам обусловлен тем, что только несколько проб отбиралось непосредственно в лавах и других горных выработках. Отбор основной массы проб воды производился на выходе из шахт или на поверхности, после того как кислые шахтные воды прошли долгий путь взаимодействия с вмещающими породами и взвешенным веще-

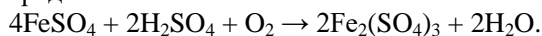
ством. В отобранных в горных выработках пластовых фоновых водах, где наблюдался дефицит молекулярного кислорода, окисление сульфида железа шло преимущественно химическим путем и в основном за счет кислорода воды (участвовало до 95 %).

Согласно изотопной модели [1], редукция сульфатов шахтных и природных вод приводит к возрастанию содержания серы-34 и кислорода-18 в остаточных сульфатах. В этих условиях усиливается расходование молекулярного кислорода на окисление двухвалентного железа, органического вещества и восстановленных газов (метана и сероводорода). Затем, по мере увеличения водного стока, скорости движения водных масс и их объемов, а также снижения степени загрязненности и эвтрофирования, наблюдается рост окислительно-восстановительного потенциала в направлении р. Дон, Гузлов → Таганрогский залив → Азовское море (таблица).

Для лучшего представления и понимания результатов мы нанесли их на рисунок, приведенный в работе [1]. Оказалось, что большая часть фигуративных точек шахтных вод легла в поле значений Eh-pH, имеющих отношение к железосодержащим

подземным водам в районах сульфидных месторождений. Основными формами нахождения растворенного железа здесь следует считать  $\text{Fe}^{2+}$ . Если исходить из представленных реакций [7] (1)–(3), то при окислении пирита образуется как закисное, так и окисное железо. Это подтверждается нашими данными, указывающими на примерно равное содержание обеих форм растворенного железа. Двухвалентное железо может окисляться до трехвалентного, на условиях низких значений pH и относительно невысоких Eh (последнее неустойчиво).

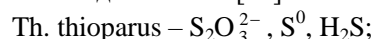
Возникает резонный вопрос относительно судьбы сульфата окиси железа ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) (3). Отметим, что основная особенность окисления закисного железа с участием *Th. ferrooxidans*, чья важная роль отмечалась в работах [1, 11], – это наличие кислой среды:



(pH = 1,8–3,8),  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$ ,  
при  $\Delta G = -11000$  кал. (4)

Судя по диаграмме (рис. 4), растворенная форма нахождения  $\text{Fe}^{3+}$  может существовать только в условиях высоких значений Eh и низких pH, т.е. практически в той же обстановке, что и бактерии рода *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans*. Экспери-

ментальные исследования [11] показали, что в рудничных водах были также найдены строго аэробные микроорганизмы рода *Th. thiooxidans* и *Th. thioparus*. Оптимумом развития для первых были значения pH = 2,5–3,5, а для вторых – pH = 7,0–9,0. Эти организмы в органических веществах не нуждаются, основные источники энергии для их проявления в кислых средах и роста ограничены сернистыми соединениями [12]:



*Th. ferrooxidans* –  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}, \text{S}^0, \text{S}_4\text{O}_6^{2-}, \text{S}^{2-}, \text{S}_2\text{O}_4^{2-}, \text{SO}_3^{2-}, \text{FeSO}_4, \text{FeS}_2$  и сульфидных минералов.

Очевидно, что при участии кислорода воздуха в биохимическом процессе окисления свежей поверхности сульфида железа и других сернистых соединений происходит образование (реакция 2) трехвалентного сульфата железа, который может сохраняться некоторое время наряду с сульфатом двухвалентного железа в воде даже при Eh шахтных вод ниже условной границы +800,0 мВ. Это приводит к образованию растворов, которые гидрохимик С.А. Дуров [13] назвал водами «чистого генетического типа».

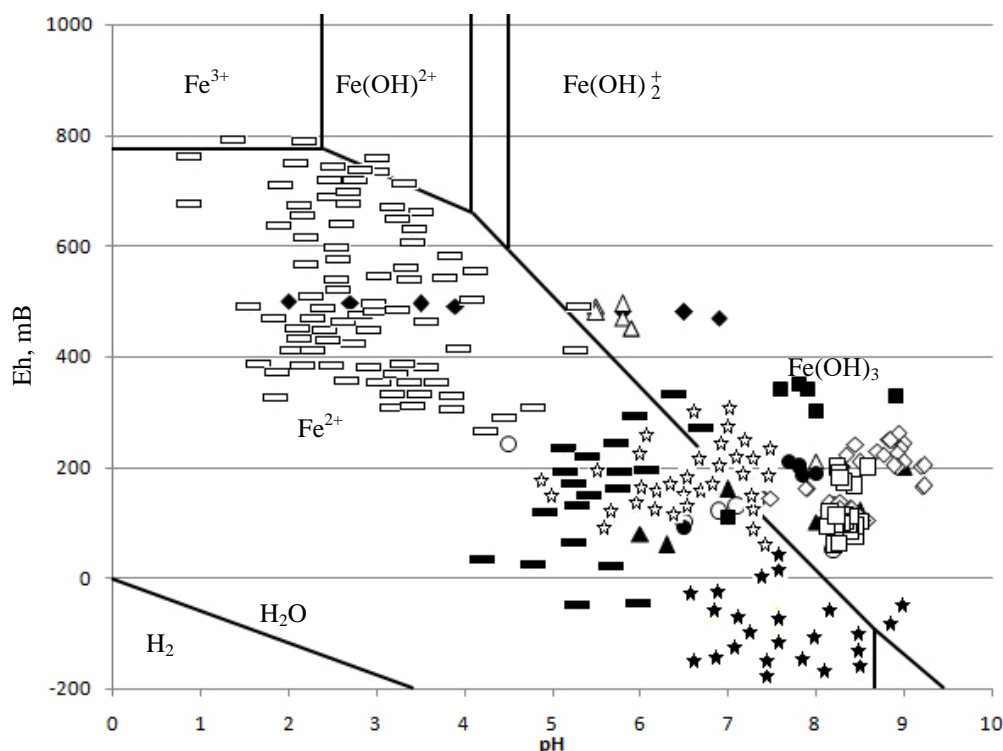


Рис. 4. Положение железосодержащих подземных вод на Eh–pH-диаграмме Fe–H<sub>2</sub>O по [10] с добавлениями авторов:

◻ – железосодержащие кислые подземные воды в районах сульфидных месторождений; ■ – грунтовые с высокой концентрацией органических веществ; ◻ – бескислородные и бессульфидные подземные воды; ★ – сульфидные подземные воды, ▲ – фоновые подземные воды; ◆ – шахтные воды; △ – воды терриконов и обогатительных фабрик; ○ – пруды-отстойники; ● – малые реки; ■ – р. Дон, Тузлов, Б. Калитва; ◇ – Таганрогский залив; □ – Азовское море

Образующиеся вследствие окисления пирита при проходке горных выработок и в лавах, в процессе добычи угля кислые шахтные воды «чистого генетического типа» смешиваются с водами другого генезиса, перемещаются по водоотводным каналам до емкости-накопителя и затем в результате водоотлива попадают на поверхность земли в пруды-накопители и пруды-аэраторы и далее транзитом могут поступить в речные артерии. По мере взаимодействия с горными породами и угольной массой происходят повышение минерализации, значений рН, снижение Eh и изменение химического типа вод, параллельно с которым наблюдаются образование гидроксидного коллоидного железа ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) и его выпадение в осадок. Этот процесс можно проследить на рис. 4, где видно, как фигуративные точки некоторых проб шахтных вод, терриконов и обогатительных фабрик, прудов-отстойников и аэраторов, а также воды рек, Таганрогского залива и собственно Азовского моря смещаются в область преимущественного нахождения трехвалентного железа в виде коллоидной формы миграции. На приведенной диаграмме показаны поля преобладания только неорганических форм нахождения железа:  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{+}_2$ , в то время как известна способность  $\text{Fe}^{3+}$  к образованию устойчивых комплексных соединений с органическими веществами гумусового ряда – фульво- и гуминовыми кислотами. Отметим также одну особенность шахтных вод угольных шахт – это наличие большого количества взвешенных частиц минерального и органического происхождения. Но самым, на наш взгляд, важным является присутствие в шахтных водах реакционно-способных мелкодисперсных наночастиц, которые могут участвовать в процессах сорбции-десорбции железа и изменения форм его нахождения и миграции, на что мы обращаем внимание впервые.

С.Р. Крайнов и др. [14] рассчитали, что если подземные воды не содержат комплексобразующих органических веществ, то после осаждения гидроксида железа в них может находиться только  $0,02 \text{ мг/дм}^3$  растворенного общего железа. В нашем случае (таблица) эта величина в природных и шахтных подземных водах, а также водах прудов и малых рек районов угледобычи превышена в два-три десятка раз. Это можно объяснить тем, что «скрытый» в устойчивом комплексном соединении ион  $\text{Fe}^{3+}$  координационно химически защищен от взаимодействия с ионом  $\text{OH}^-$ , что и способствует сохранению высоких концентраций растворенного железа в данных водах. Как полагают эти авторы, только при значительном увеличении концентрации гидроксильного иона (рН больше 7,5–8,0) ион  $\text{OH}^-$  вытесняет анионы фульвокислот из координа-

ционной сферы комплексных соединений и через формирование смешанных комплексных соединений образует гидроксид железа. Для наших условий это происходит лавинообразно при значениях рН в пределах 6,5–8,5 и продолжается при более высоких значениях.

Фигуративные точки фоновых подземных вод попали на границу раздела двух неорганических форм (рис. 4). Это указывает на то, что растворенное железо может находиться в них в форме как  $\text{Fe}^{2+}$ , так и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . В некоторых оказавшихся на поверхности пробах шахтных вод, в водах терриконов, малых рек, р. Дон, Тузлов, Таганрогского залива и собственно Азовского моря общее железо должно быть представлено его гидроксидом. Однако экстремально высокие содержания железа общего в поверхностных водах района угледобычи и повышенные в речных, эстуарных и морских водах свидетельствуют о том, что оно находится здесь в коллоидном состоянии, в виде комплексов с органическим и минеральным веществом. Это подтверждается работой [15], где представлены результаты экспериментального моделирования коллоидных систем в подземных водах. Показано, что устойчивость коллоида гидроксида железа (III) определяется присутствием ионов кремния и гуминовых веществ в подземных водах и достигает 60 сут и более в зависимости от последовательности введения в раствор реактивов ионов кремния, гумата натрия, ионов железа и их соотношения. Сравнение среднего содержания общего растворенного железа в океанических водах ( $0,01 \text{ мг/дм}^3$ ), которое, по мнению [16], представлено в форме  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , говорит о его многократном снижении по сравнению с водами Азовского моря. Это является следствием нахождения большей части наночастиц гидроксида железа в море в виде коллоидов, устойчивость которых обусловлена присутствием ионов кремния, гуминовых и фульвокислот.

### Заключение

1. Высокое содержание железа в шахтных водах и водах обогатительных фабрик и терриконов обусловлено бактериальным и химическим окислением пирита ( $\text{FeS}_2$ ), содержащимся в угольных пластах и вмещающих породах.

2. Шахтные воды имеют в основном относительно низкие значения рН – от кислой реакции до нейтральной – и высокие содержания железа. По мере прохождения шахтных вод по выработкам их водородный показатель повышается, а общее содержание железа снижается.

3. При поступлении шахтных вод вследствие водоотлива на земную поверхность и взаимодейст-

вия с породами и поверхностными водами происходят дальнейшее повышение значений рН и переход двухвалентного железа в трехвалентное состояние, сопровождающееся осаждением последнего в донные отложения.

4. По мере увеличения водного стока, скорости движения водных масс и их объемов, а также снижения степени загрязненности и эвтрофирования наблюдается рост окислительно-восстановительного потенциала в направлении р. Дон, Тузлов → Таганрогский залив → Азовское море.

5. Наблюдается снижение содержания растворенного железа в направлении шахтные воды → речные → морские, и напротив, увеличение уровня рН в том же направлении.

6. В морских водах устойчивость коллоидов  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  обусловлена способностью  $\text{Fe}^{+3}$  к образованию прочных комплексных соединений с ионами кремния и органическими веществами гумусового ряда – фульво- и гуминовыми кислотами.

#### Литература

1. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М., 1999. 370 с.
2. Гриненко В.А., Федоров Ю.А. Исследования взаимосвязи изотопного состава серы сульфатов с химическим составом шахтных вод Восточного Донбасса // Водные ресурсы. 1990. № 6. С. 152–161.
3. Гриненко В.А., Никаноров А.М., Федоров Ю.А. Изотопно-химические показатели генезиса сульфатов природных вод угледобывающих районов (на примере Восточного Донбасса) // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313, № 3. С. 693–696.
4. Федоров Ю.А., Предеина Л.М., Дмитрик Л.Ю. Железо: распределение, формы нахождения и миграции в поверхностных и шахтных водах Восточного Донбасса и Азовского моря // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д., 2015. С. 332–336.
5. РД 52.24.358-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации железа общего в водах фотометрическим методом с 1,10-фенантролином. Ростов н/Д., 1995. С. 12.
6. Федоров Ю.А., Сапожников В.В., Агатова А.И., Аржанова Н.В., Белов А.А., Кузнецов А.Н., Лапина Н.М., Loginov E.B., Предеина Л.М., Семочкина Т.Б., Торгунова Н.И. Комплексные экосистемные исследования в российской части Азовского моря (18–25 июля 2006 г.) // Океанология. 2007. Т. 47, № 2. С. 316–319.
7. Taylor B.E., Wheeler M.S., Nordstrom D.K. Stable isotope geochemistry of acid mine drainage: Experimental oxidation of pyrite // Geochim et Cosmochim Acta. 1984. Vol. 48, № 12. P. 2669–2678.
8. Федоров Ю.А., Дмитрик Л.Ю. Поведение железа в системе «шахтные воды – река – Азовское море» // Актуальные вопросы современных физико-математических и естественных наук: сб. материалов междунар. науч. симпозиума. Москва, 29–30 июня 2015 г. / под ред. Ю.А. Фёдорова. Киров, 2015. С. 145–152.
9. Алевин О.А. Основы гидрохимии. Л., 1970. 443 с.
10. Назаренко О.В., Федоров Ю.А. Закономерности формирования и антропогенного преобразования родников Ростовской области. Ростов н/Д., 2014. 210 с.
11. Табаксблат Л.С. Значение микрофлоры в геохимической трансформации сульфидных рудничных вод // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.А. Фёдорова. Ростов н/Д., 2007. С. 330–334.
12. Иванов С.Н., Ляликова Н.П., Кузнецов С.И. Роль тионовых бактерий в выветривании горных пород и сульфидных руд // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1958. № 2. С. 183–191.
13. Дуров С.А. Синтез в геохимии. Ростов н/Д., 1961. 246 с.
14. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред. Н.П. Лавров. М., 2012. 672 с.
15. Шиян Л.Н., Мачехина К.И., Кончакова Н.В. Механизм образования коллоидных соединений железа в процессе водоподготовки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 358.
16. Хорн Р. Морская химия. М., 1972. 399 с.

#### References

1. Fedorov Yu.A. *Stabil'nye izotopy i evolyutsiya gidrosfery* [Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere]. Moscow, 1999, 370 p.
2. Grinenko V.A., Fedorov Yu.A. *Issledovaniya vzaimosvyazi izotopnogo sostava sery sulfatov s khimicheskim sostavom shakhtnykh vod Vostochnogo Donbassa* [Studies the relationship of the isotopic composition of sulfate sulfur chemical composition of mine waters of the Eastern Donbass]. *Vodnye resursy*, 1990, no 6, pp. 152-161.
3. Grinenko V.A., Nikanorov A.M., Fedorov Yu.A. *Izotopno-khimicheskie pokazateli genezisa sulfatov prirodnykh vod ugledobyvayushchikh raionov (na primere Vostochnogo Donbassa)* [Isotopic and chemical indicators of the genesis of sulfates of natural water in coal mining areas (in the example of Eastern Donbass)]. *Dokl. AN SSSR*, 1990, vol. 313, no 3, pp. 693-696.
4. Fedorov Yu.A., Predeina L.M., Dmitrik L.Yu. [Iron: distribution, shape and location of migration in the surface and mine waters of the Eastern Donbass and Azov Sea]. *Ekologicheskie problemy. Vzglyad v budushchee* [Ecological problems. Looking to the future]. *Sat. tr. VII International scientific-practical conf. Rostov-on-Don*, 2015, pp. 332-336.
5. *RD 52.24.358-95. Metodika vypolneniya izmerenii massovoi kontsentratsii zheleza obshchego v vodakh fotometricheskim metodom s 1,10-fenantrolinom* [RD 52.24.358-95. Methods of measurement of the mass concentration of total iron in the waters of the photometric method with 1,10-phenanthroline]. Rostov-on-Don, 1995, p. 12.
6. Fedorov Yu.A., Sapozhnikov V.V., Agatova A.I., Arzhanova N.V., Belov A.A., Kuznetsov A.N., Lapina N.M., Loginov E.B., Predeina L.M., Semochkina T.B., Torgunova N.I. *Kompleksnye ekosistemnye issledovaniya v rossiiskoi chasti Azovskogo morya (18-25 iyulya 2006 g.)* [Complex ecosystem research in the Russian part of the Sea of Azov (July 18-25, 2006)]. *Okeanologiya*, 2007, vol. 47, no 2, pp. 316-319.

7. Taylor B.E., Wheeler M.S., Nordstrom D.K. Stable isotope geochemistry of acid mine drainage: Experimental oxidation of pyrite. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 1984, vol. 48, no 12, pp. 2669-2678.
8. Fedorov Yu.A., Dmitrik L.Yu. [The behavior of iron in the system "mine water River, the Sea of Azov"]. *Aktual'nye voprosy sovremennykh fiziko-matematicheskikh i estestvennykh nauk* [Actual problems of modern physics, mathematics and natural sciences]. Sat. materials Intern. scientific e-symposium. Moscow, June 29-30, 2015. Ed. Yu.A. Fedorov. Kirov, 2015, pp. 145-152.
9. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Basics of hydrochemistry]. Leningrad, 1970, 443 p.
10. Nazarenko O.V., Fedorov Yu.A. *Zakonomernosti formirovaniya i antropogennogo preobrazovaniya rodnikov Rostovskoi oblasti* [Laws of formation and transformation of human springs of Rostov Region]. Rostov-on-Don, 2014, 210 p.
11. Tabaksblat L.S. Znachenie mikroflory v geokhimicheskoi transformatsii sul'fidnykh rudnichnykh vod [The value of the microflora in the geochemical transformation of sulfide mine waters]. *Ekologicheskie problemy. Vzglyad v budushchee* [Ecological problems. Looking to the future]. Sat. tr. VII International scientific-practical conf. Ed. Yu.A. Fedorov. Rostov-on-Don, 2015, pp. 330-334.
12. Ivanov S.N., Lyalikova N.P., Kuznetsov S.I. Rol' tionovykh bakterii v vyvetrivanii gornykh porod i sul'fidnykh rud [Thiobacteria role in the weathering of rocks and sulphide ores]. *Izv. AN SSSR. Ser. biol.*, 1958, no 2, pp. 183-191.
13. Durov S.A. *Sintez v geokhimii* [Synthesis in geochemistry]. Rostov-on-Don, 1961, 246 p.
14. Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects]. Ed. N.P. Laverov. Moscow, 2012, 672 p.
15. Shiyan L.N., Machekhina K.I., Konchakova N.V. Mekhanizm obrazovaniya kolloidnykh soedinenii zheleza v protsesse vodopodgotovki [The mechanism of formation of colloidal iron compounds in the water treatment process]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no 4, p. 358.
16. Khorn R. *Morskaya khimiya* [Marine chemistry]. Moscow, 1972, 399 p.

УДК 631.4

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-100-109

## ГОЛОЦЕНОВЫЕ СИГНАЛЫ ГУМИДИЗАЦИИ КЛИМАТА В ПРОФИЛЯХ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ ЦЕНТРА ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЫ\*

© 2016 г. Ю.Г. Чендев, А.Н. Петин, В.Д. Березуцкий, А.В. Долгих, В.Г. Белеванцев, Д.И. Дудин

Чендев Юрий Георгиевич – доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования и земельного кадастра, факультет горного дела и природопользования, Белгородский национальный исследовательский университет, ул. Победы, 15, г. Белгород, 308015, e-mail: Chendev@bsu.edu.ru

Петин Александр Николаевич – доктор географических наук, профессор, декан факультета горного дела и природопользования, Белгородский национальный исследовательский университет, ул. Победы, 15, г. Белгород, 308015, e-mail: Petin@bsu.edu.ru

Березуцкий Валерий Дмитриевич – кандидат исторических наук, доцент, кафедра истории России, Воронежский государственный педагогический университет, ул. Ленина, 86, г. Воронеж, 394043, e-mail: berezyski1@rambler.ru

Долгих Андрей Владимирович – кандидат географических наук, научный сотрудник, отдел географии и эволюции почв, Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29, г. Москва, 119017, e-mail: an.dolgikh@gmail.com

Белеванцев Валерий Григорьевич – старший преподаватель, кафедра природопользования и земельного кадастра, факультет горного дела и природопользования, Белгородский национальный исследовательский университет, ул. Победы, 15, г. Белгород, 308015, e-mail: belaral@bk.ru

Дудин Дмитрий Игоревич – магистрант, кафедра природопользования и земельного кадастра, факультет горного дела и природопользования, Белгородский национальный исследовательский университет, ул. Победы, 15, г. Белгород, 308015, e-mail: mityadudin2010@ya.ru

Chendev Yurii Georgievich – Doctor of Geographical Science, Associate Professor, Head of Department of Natural Resources Management and Land Cadaster, Faculty of Natural Resource Management and Mining, Belgorod National Research University, Pobeda St., 15, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: Chendev@bsu.edu.ru

Petin Aleksandr Nikolaevich – Doctor of Geographical Science, Professor, Dean of the Faculty of Natural Resource Management and Mining, Belgorod National Research University, Pobeda St., 15, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: Petin@bsu.edu.ru

Berezutskii Valerii Dmitrievich – Candidate of Historical Science, Associate Professor, Department of Russian History, Voronezh State Pedagogical University, Lenin St., 86, Voronezh, 394043, Russia, e-mail: berezyski1@rambler.ru

Dolgikh Andrei Vladimirovich – Candidate of Geographical Science, Researcher, Department of Soil Geography and Evolution, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetnyi Lane, 29, Moscow, 119017, Russia, e-mail: an.dolgikh@gmail.com

Belevantsev Valerii Grigor'evich – Senior Lecturer, Department of Natural Resources Management and Land Cadaster, Faculty of Natural Resource Management and Mining, Belgorod National Research University, Pobeda St., 15, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: belaral@bk.ru

Dudin Dmitrii Igorevich – Master Student, Department of Natural Resources Management and Land Cadaster, Faculty of Natural Resource Management and Mining, Belgorod National Research University, Pobeda St., 15, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: mityadudin2010@ya.ru

Изучены современные и подкурганые черноземы, сформировавшиеся 3500–3700 и 4300–4600 лет назад на территории юго-востока Среднерусской возвышенности. По комплексу признаков установлены более влажные климатические условия формирования палеочерноземов по сравнению с современными обстановками. При близких к современным характеристиках карбонатных профилей содержание и запасы гумуса в палеочерноземах превосходили современные природные аналоги в 1,6–2,6 раза. Учитывая разделение рассматриваемых хроноинтервалов фазой резкой аридизации климата 4000–4200 лет назад, амплитуда природно-климатических изменений, происходивших на юго-востоке Среднерусской возвышенности в интервале времени 3500–4600 лет назад (особенно 3700–4300 лет назад), могла быть самой высокой на протяжении голоцена.

**Ключевые слова:** голоцен, эволюция почв, черноземы, Среднерусская возвышенность.

Modern and buried under mounds chernosem soils, developed 3500–3700 and 4300–4600 years ago have been studied within South-Eastern part of Central Russian Upland. According to the buried soils properties, more humid climatic conditions took place in the study periods on comparison with modern climatic state. Carbonate profiles of buried and modern soils have about similar parameters, but according to reconstruction of organic matter, soil organic carbon stocks in the past were in 1,6–2,6 times more than contemporary indexes. Taking into account separation of the study periods by extremely dry climatic episode 4000–4200 years ago, variability of climatic conditions in the South-East of Central Russian Upland during interval 3500–4600 years ago (especially 3700–4300 years ago) could be the highest for all Holocene.

**Keywords:** holocene, evolution of soils, chernozems, Central Russian Upland.

\*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №14-17-00171) на тему «Региональные отклики компонентов окружающей среды на изменения климата разной периодичности: юг лесостепи Среднерусской возвышенности».

Изменчивость климата является одним из определяющих факторов эволюции почв в голоцене [1–5]. В существующих схемах-реконструкциях голоценовых изменений природной среды и почв черноземной зоны Восточной Европы до последнего времени доминировали выводы, согласно которым черноземы среднего и начала позднего голоцена формировались в более засушливых биоклиматических обстановках по сравнению с современными условиями, и главным трендом их современного развития было увеличение мощности гумусовых профилей и выщелачивание в ответ на увлажнение климата, начавшееся после 4000 лет назад, которое к 2800–2500 лет назад привело к формированию черноземов, по мощности близко соответствовавших современным аналогам [1–4]. В свете последних данных указанные представления могут показаться слишком общими, так как учитывают лишь трендовые изменения черноземов на достаточно длинной временной шкале.

Применительно к лесным ландшафтам лесостепи центра Восточной Европы уже рассматривалось влияние эпизодических аридизаций климата на почвы и растительность в субатлантический период голоцена [6]. За последние годы на ряде объектов,

изученных на территории лугово-степных ландшафтов лесостепной и степной зон Среднерусской возвышенности, были получены новые сведения, которые могут быть использованы для уточнения и детализации существующих хроносхем развития почв и природной среды рассматриваемой территории в голоцене.

Цель настоящего исследования заключается в анализе палеоклиматических сигналов, «записанных» в признаках разновозрастных черноземов центра Восточной Европы, отражающих более влажные по сравнению с современными условия климата в различные хроносрезы второй половины голоцена.

### Объекты и методы исследований

В ходе проведения комплексных почвенно-археологических исследований на территории юго-востока Среднерусской возвышенности на ряде ключевых участков были изучены современные и погребенные под курганами бронзового века черноземы (рис. 1). Все ключевые участки исследования относятся к территории бассейна р. Дон.

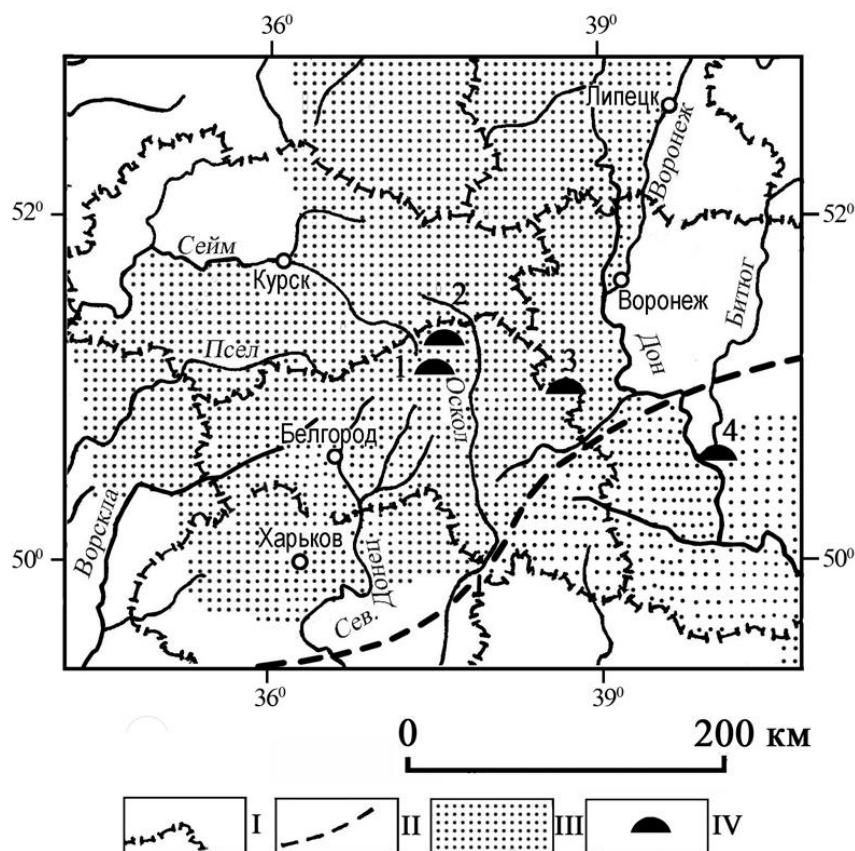


Рис. 1. Местоположение участков исследования: I – административные границы областей; II – граница лесостепи и степи; III – лесостепная и степная части Среднерусской возвышенности; IV – ключевые участки исследования: 1 – Ямская степь; 2 – Губкинский; 3 – Горки; 4 – Крицкий

На участке Ямская степь в центре лесостепной зоны (Губкинский район Белгородской области) на ровном водоразделе был исследован однослойный курган, сооруженный населением среднедонской катакомбной культуры бронзового века (охранные раскопки проводились археологом Е.Н. Мельниковым в 2012 г.; подробная информация о результатах исследования почв кургана и смежных с ним объектов палеоэкологических реконструкций содержится в работе [7]). На основании радиоуглеродной даты нагара на стенке керамического сосу-

да из основного погребения возраст кургана оценен в  $4630 \pm 180$  некалиброванных лет (Ki-17867, табл. 1). Под насыпью кургана были исследованы профиль погребенного чернозема, а на удалении  $25 \div 30$  м от основания кургана – в идентичных литолого-геоморфологических условиях профиль фонового (современного) чернозема. На указанном участке почвообразующими породами являются маломощные средние карбонатные лессовидные суглинки, подстилаемые легкими суглинками и супесями древнеаллювиального происхождения.

Таблица 1

### Результаты радиоуглеродного датирования

Образец	Лаб. номер	Радиоуглеродный ( $^{14}\text{C}$ ) возраст	
		Некалиброванный возраст, лет назад (BP)	Калиброванный возраст (1 $\sigma$ , 68,2%; 2 $\sigma$ , 95,4%)
Ямская степь, нагар на сосуде	Ki-17867	$4630 \pm 180$	1 $\sigma$ 3633–3105 до н.э. 2 $\sigma$ 3764–2904 до н.э.
Крицкий, погребение 2, содержание сосуда	Ki-19106	$4590 \pm 120$	1 $\sigma$ 3516–3104 до н.э. 2 $\sigma$ 3636–2942 до н.э.
Крицкий-15, погребение 2, кость	Ki-19105	$4150 \pm 40$	1 $\sigma$ 2870–2666 до н.э. 2 $\sigma$ 2880–2620 до н.э.
Крицкий-15, погребение 1, кость	Ki-19104	$4060 \pm 50$	1 $\sigma$ 2834–2490 до н.э. 2 $\sigma$ 2861–2472 до н.э.

Участок Губкинский (Губкинский район Белгородской области) находится в 20 км к северу от участка Ямская степь. Здесь на ровном водоразделе был изучен курган, который, судя по обнаруженным на его поверхности фрагментам керамики, был сооружен населением срубной культурно-исторической общности бронзового века около 3500 лет назад (археологическая датировка А.Г. Дьяченко). Раскопки данного кургана не проводились, погребенный чернозем под центральной частью насыпи был изучен в 1991 г. в серии кернов, отобранных специальным тонкоствольным почвенным буром в рамках мониторинга состояния курганов Белгородской области, подвергающихся антропогенным воздействиям [8]. Фоновый чернозем был изучен в 30 м от основания кургана в почвенном разрезе. На данном участке почвообразующими породами являются средние карбонатные лессовидные суглинки.

Участок Горки находится на юге лесостепи Среднерусской возвышенности (Красненский район Белгородской области). Курган расположен на высокой платообразной поверхности водораздела, имеющей слабый ( $2\text{--}3^\circ$ ) уклон к северу, рядом с крутобережной частью долины р. Потудань. Курган изучался Донской археологической экспедицией под руководством В.И. Гуляева в 2005 г. Курган создавался в 2 этапа: первичная насыпь была создана населением среднедонской катакомбной куль-

туры в интервале 3600–3700 лет назад, а верхняя досыпка была создана в финальный этап существования данной культуры – в интервале 3500–3600 лет назад (археологические датировки В.И. Гуляева) [9]. Профиль погребенного чернозема был изучен под центральной частью первичной насыпи кургана, а профиль фонового чернозема изучался в разрезе, заложенном в 30 м от основания кургана в идентичных литолого-геоморфологических условиях. На участке исследования почвообразующими породами являются тяжелые карбонатные моренные суглинки периода донского оледенения, содержащие окатанные рыхлые обломки меломергельной породы.

Участок Крицкий находится на севере степной зоны (Павловский район Воронежской области). Здесь, на абсолютно ровной поверхности второй надпойменной террасы р. Битюг (с глубиной залегания грунтовых вод более 5 м), в 3,5 км от места ее впадения в р. Дон, археологической экспедицией «Возвращение к истокам» под руководством В.Д. Березуцкого в 2015 г. был изучен однослойный курган среднедонской катакомбной культуры [10]. По костям двух впускных погребений в курган были получены некалиброванные датировки этих погребений:  $4060 \pm 50$  лет назад (Ki-19104) и  $4150 \pm 40$  лет назад (Ki-19105), а возраст остатков органики, отобранных с внутренней стенки сосуда более древнего из двух рассматриваемых погребе-



ний, оказался равным  $4590 \pm 120$  лет назад (Ki-19106) (табл. 1). Эта последняя датировка имеет большое стандартное отклонение возраста и, по нашему мнению, является «удревненной» (рис. 2), так как, вероятно, налет органического происхождения на внутренней стенке изученного сосуда был загрязнен углеродом почвенных карбонатов, миграция которых могла происходить в почвенном

заполнении впускного захоронения. Основное, более древнее погребение изучить не удалось из-за его сильной нарушенности землероями. На основании полученных данных (с учетом датировки кости и остатков органики с внутренней стенки сосуда наиболее древнего изученного погребения) примерное время создания кургана нами было принято равным 4200–4300 лет назад (рис. 2).

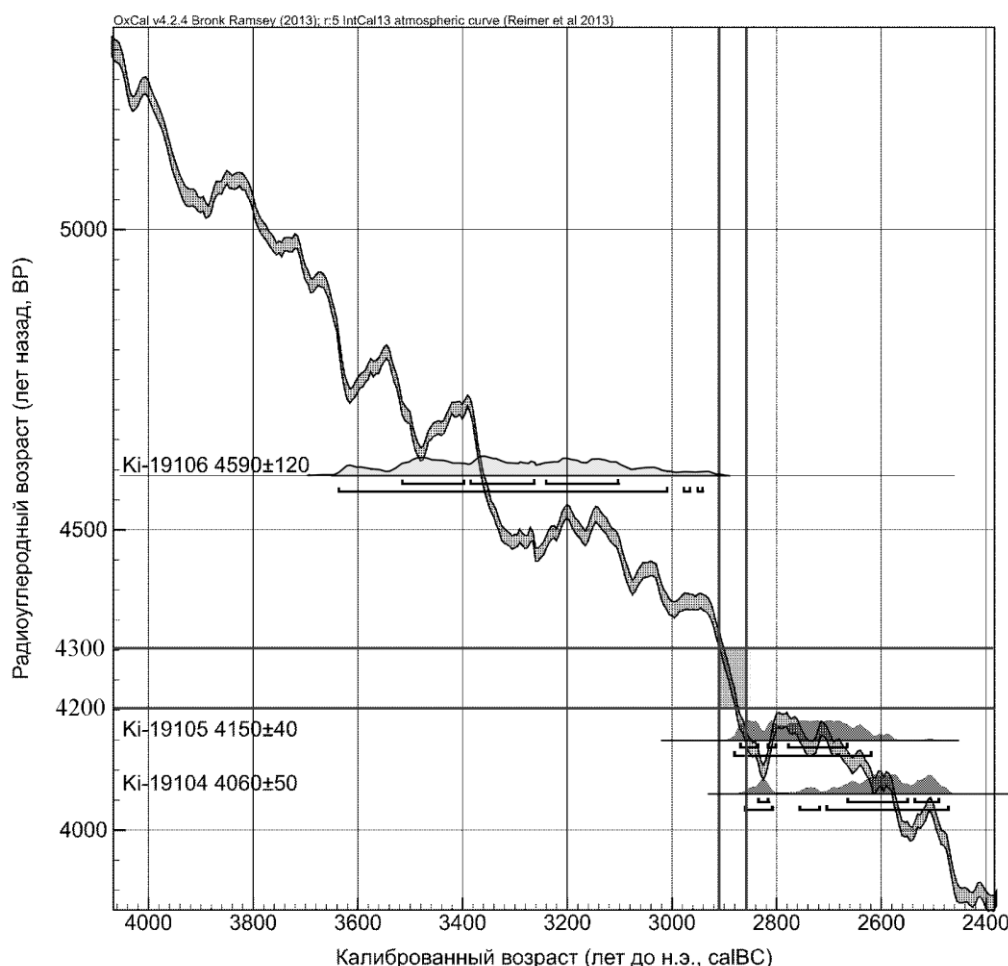


Рис. 2. Положение калибровочных интервалов радиоуглеродных дат на калибровочной кривой IntCal 13. Курган участка Крицкий. Показаны калибровочные интервалы радиоуглеродных дат по костям из погребений, интервал для радиоуглеродной даты по органическим остаткам внутренней стенки керамического сосуда, область соприкосновения калибровочных интервалов радиоуглеродных дат по органическим остаткам и кости

Профиль погребенного чернозема был изучен под центральной частью курганной насыпи, а профиль фонового чернозема – в 25 м от основания кургана. Почвообразующими породами являются средние карбонатные лессовидные суглинки.

В качестве примера сравниваемых пар почв «под-курганный – фоновый черноземы» на рис. 3 представлен общий вид профилей погребенного и фонового черноземов, изученных на участке Крицкий.

Фоновыми почвами на участках Ямская степь и Губкинский являются черноземы типичные, на участке Горки (вблизи границы лесостепи и степи) – черноземы обыкновенные, на участке Крицкий (север степной зоны) – черноземы обыкновенные.

Основными методами исследования были почвенно-археологический, или метод почвенных хронологий, метод морфологического анализа почвенного профиля, сравнительный метод исследования,

методы химического анализа почвенных свойств (содержание  $\text{CO}_2$ -карбонатов и Сорг.).

Датирование курганов и погребенных под ними почв производилось археологическим методом (ме-

тодом аналогий), а также методом радиоуглеродного анализа органических остатков (угля, костей, органического вещества, снятого со стенок глиняной посуды, нагара органики на глиняной посуде).

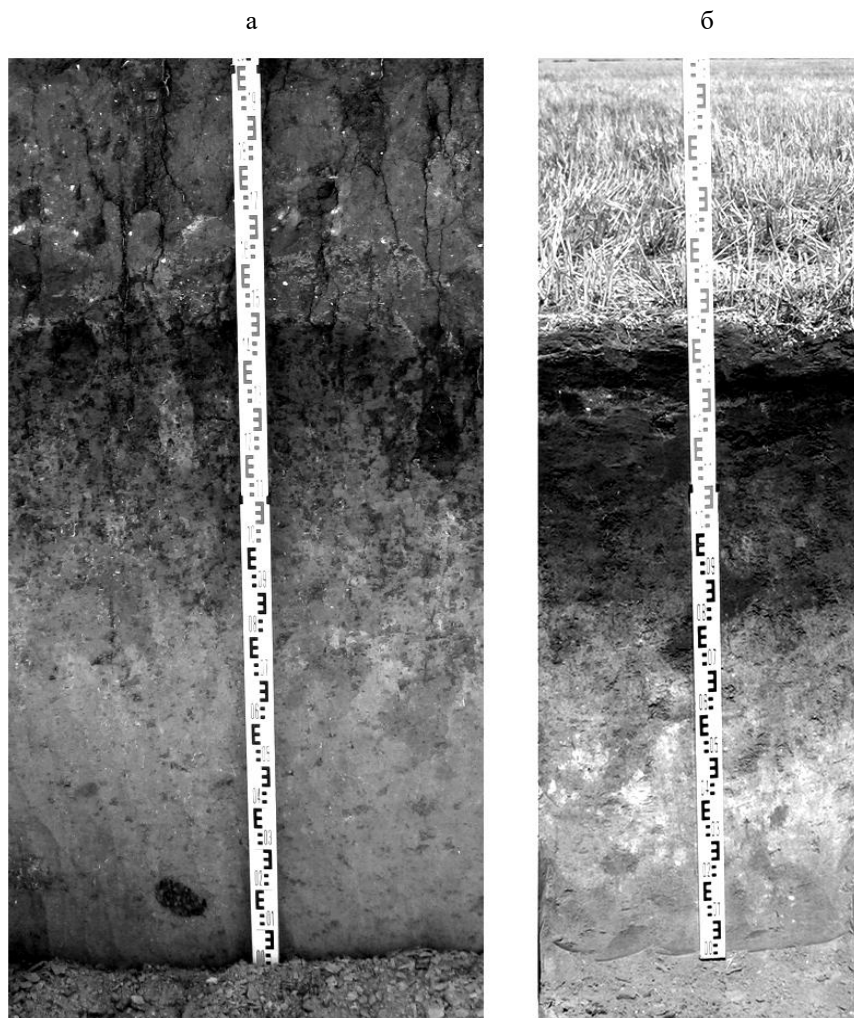


Рис. 3. Профиль чернозема типичного, погребенного под курганом возраста около 4 300 лет (а), и профиль фонового чернозема обыкновенного (б). Павловский район Воронежской области, участок Крицкий

Все радиоуглеродные датировки были получены в Киевской радиоуглеродной лаборатории. Калибровка радиоуглеродных дат проводилась А.В. Долгих в программе OxCal v4.2.4 [11] на основе калибровочной кривой IntCal 13 [12].

### Результаты и их обсуждение

Судя по морфометрическим признакам гумусовых профилей (A1+A1B) современных и подкурганых черноземов (табл. 2), во всех случаях они показывают небольшие различия, находящиеся в пределах 10–19 % от мощности погребенных почв. Так как именно мощность гумусовых гори-

зонтов и гумусовых профилей черноземов Восточной Европы часто привлекается для обоснования выразительных трендов их позднеголоценовой эволюции [1, 3–5 и др.], следует полагать, что природные условия периодов захоронения почв при создании курганных насыпей были близки к современным. Различия по глубине вскипания между фоновыми и подкурганскими черноземами показали большие отличия по сравнению с гумусовыми профилями, причем в пользу более высокой линии залегания карбонатов в палеочерноземах – в трех случаях из четырех (табл. 2). Принимая во внимание более высокую чувствительность карбонатных профилей почв на изменения клима-

та по сравнению с их гумусовыми профилями [4 и др.], можно предположить, что повышенная линия вскипания в палеочерноземах по сравнению с современными почвами отражает начало аридных

климатических фаз после фаз гумидного климата, на которые уже успели отреагировать карбонатные профили палеочерноземов и пока не успели их гумусовые профили.

Таблица 2

### Морфометрические характеристики изученных фоновых и подкурганых черноземов бронзового века

Название участка	Абсолютная высота местности, м	Высота кургана и время создания	Почва	Мощность верхних горизонтов и гумусового профиля, см			Глубина вскипания, см
				A1	A1B	A1+A1B	
Ямская степь	226	0,7 м, 4630±180 лет назад	Фоновая	23	42	65	65
			Погребенная	20	60	80	49
			Разность	+3	-18	-15	+16
Крицкий	100	0,8 м, около 4300 лет назад	Фоновая	31	25	56	54
			Погребенная	28	23	51	29≈
			Разность	+3	+2	+5	+25
Губкинский	210	1,2 м, около 3500 лет назад	Фоновая	55	10	65	60
			Погребенная	30	25	55	25
			Разность	+25	-15	+10	+35
Горки	165	1,6 м, 3600–3700 лет назад	Фоновая	30	20	50	42
			Погребенная	27	17	44	50
			Разность	+3	+3	+6	-8

Повышенные уровни вскипания в палеочерноземах обусловлены формами карбонатов, которые визуально не были выражены (очевидно, это наиболее мобильные карбонаты, которые иногда диагностируются под микроскопом в форме игольчатого кальцита или люблинита). Визуальные формы

карбонатных новообразований, изученные в более глубоких слоях профилей подкурганых черноземов, указывают на более влажные условия их формирования по сравнению с карбонатными новообразованиями, присутствующими в фоновых черноземах (табл. 3).

Таблица 3

### Формы карбонатных новообразований в профилях фоновых и подкурганых черноземов бронзового века

Участок	Характеристика карбонатных новообразований	
	Погребенные черноземы	Фоновые черноземы
Ямская степь	Белесые трубочки, редко рассеянные в почвенной массе	Белесовато-желтая пропитка всей почвенной массы, желто-белесые трубочки, белесоватые пятна плесени
Крицкий	Белесый мицелий, на гранях некоторых структурных агрегатов – белесые пятна плесени	Белесовато-желтая белоглазка
Губкинский	Белесый мицелий и редкие грязно-желтые журавчики	Белесый мицелий и грязно-желтые журавчики
Горки	Редкие белесые пятна белоглазки	Обильные белесые пятна белоглазки

В Ямской степи современные черноземы имеют однородную белесовато-желтую пропитку карбонатами, тогда как подкурганый чернозем характеризуется редко встречающимися белесыми прожилками карбонатов. На участке Крицкий фоновые черно-

земы содержат белоглазку, что позволяет их отнести к подтипу обыкновенных, тогда как подкурганый чернозем характеризуется карбонатным мицелием и выцветами плесени, что послужило основанием для его идентификации как чернозема типичного. На

участке Горки в иллювиально-карбонатном горизонте Вк встречается редкая белоглазка, тогда как в фоновом черноземе обилие белоглазки возрастает более чем в 3 раза (судя по частоте встречаемости данного признака на единицу площади).

Весьма важную дополнительную информацию дает сравнительный анализ особенностей профильного распределения содержания органического углерода и  $\text{CO}_2$ -карбонатов в изучаемых палеочерноземах и их современных аналогах (рис. 4).

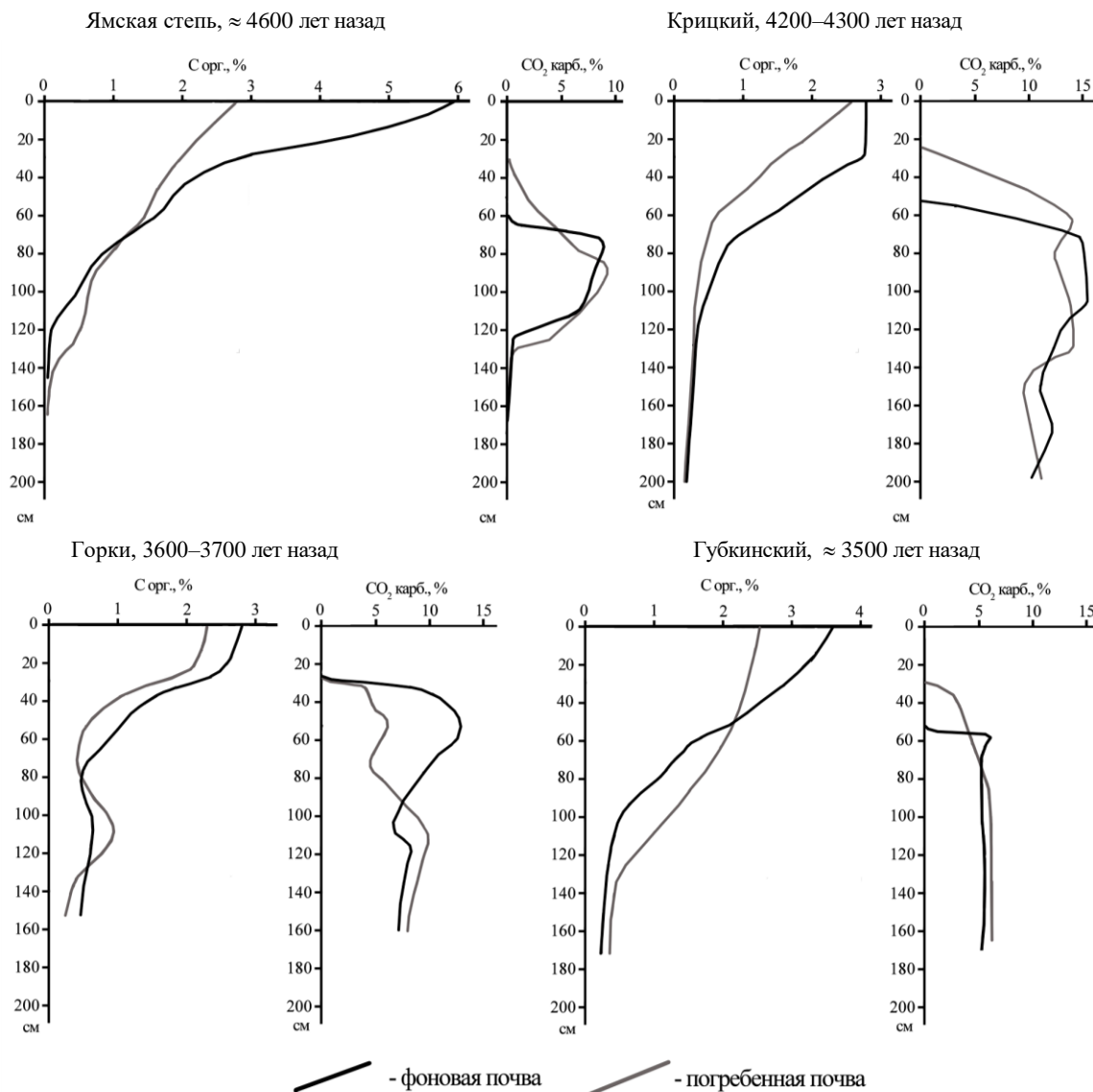


Рис. 4. Профильное распределение содержания углерода гумуса и  $\text{CO}_2$ -карбонатов в современных и подкурганых черноземах ключевых участков исследования

В профилях фоновых черноземов максимумы содержания карбонатов находятся на глубинах 60–80 см, причем эти максимумы выражены более резко по сравнению с таковыми в подкурганых черноземах. В целом по содержанию и запасам карбонатов фоновые и подкурганые черноземы отличаются несущественно, за исключением участка Горки, где фоновый чернозем характеризуется заметно большей окарбоначенностью по сравнению с подкурганым аналогом (рис. 4).

В погребенных черноземах углерод органического вещества, особенно в верхней части профилей, согласно существующим представлениям [3, 4 и др.], был подвержен диагенетическим изменениям, а именно снижению содержания и запасов в результате минерализации под воздействием деятельности микроорганизмов. Далее мы будем придерживаться следующих значений диагенетических потерь гумуса в верхних (0–20 см) слоях подкурганых черноземов: фиксируемое в наши дни ко-

личество органического вещества в палеопочвах эпохи бронзы составляет 30 % от первоначального, в палеопочвах раннего железного века – 40 %, в палеопочвах средневековья – примерно 50 % от современных значений [3].

Палеочернозем Ямской степи в слое 0–20 см содержит 2,5 % абсолютного содержания углерода гумуса. Учитывая, что это, согласно вышеуказанным представлениям, составляет 30 % от первоначального содержания, исходная величина рассматриваемого показателя могла быть около 8,3 % углерода гумуса. В слое 0–20 см фонового чернозема содержится только 5,3 % углерода гумуса. Аналогичная тенденция выявляется для сравниваемых черноземов на участке Горки (согласно реконструкции 7,3 % углерода гумуса в палеочерноземе и 2,8 % – в фоновом черноземе). Для участков Крицкий и Губкинский произвести указанные расчеты оказалось затруднительно в связи с тем, что фоновыми черноземами на данных участках выступают не целинные почвы (как в Ямской степи и на участке Горки), а почвы пашни, резерв гумуса в которых был уменьшен в результате земледельческого освоения.

На трех изученных ключевых участках (Ямская степь, Горки, Губкинский), несмотря на длительный период диагенеза гумуса в погребенных под курганами черноземах, в нижней половине их профилей (глубже 60–80 см) содержание гумуса превышает фоновые значения (рис. 4). Данное обстоятельство в совокупности с реконструированным количеством углерода органического вещества в верхних частях изученных палеочерноземов свидетельствует о том, что во время, предшествовавшее погребению черноземов, они характеризовались большими запасами органического углерода по сравнению с современными аналогами.

Таким образом, проведенный комплексный анализ карбонатных и гумусовых профилей современных и древних черноземов, изученных на юго-востоке Среднерусской возвышенности, позволяет считать, что в интервалы времени их естественной эволюции 3500–3700 и 4300–4600 лет назад природно-климатические обстановки в большей степени способствовали формированию плодородия черноземов по сравнению с современными условиями. С достаточно высокой степенью вероятности можно говорить о более влажном климате рассматриваемых хроноинтервалов, чем в наше время.

Существует ли подтверждение полученным нами результатам в работах других авторов? На этот вопрос можно ответить утвердительно. Так, по данным палинологических исследований, проведенных Е.А. Спиридоновой [13], период 4300–4600 лет назад для бассейна Среднего Дона реконструи-

руется как прохладная и влажная эпоха, в течение которой лесная зона смещалась далеко к югу.

На севере степной зоны Воронежской области были изучены реликтовые, так называемые Елизаветовские почвы, радиоуглеродный возраст которых составляет около 3500 лет [14]. В это время, согласно результатам палинологических исследований, на изучаемой территории формировались ландшафты лесостепной зоны. Рассматриваемые почвы лугового генезиса, несмотря на длительный период диагенеза под толщей позднее накопившихся аллювиальных наносов (мощностью 1 метр), при проведении агрономического опыта оказались в 2 раза более продуктивными по сравнению с черноземом обыкновенным заповедной залежи [15].

Согласно проведенным ранее исследованиям [13, 16, 17], изученные нами хроноинтервалы с более влажным, чем в наше время, климатом были разделены резко аридным климатическим этапом, хронологические рамки которого соответствуют 4170±100 – 3 970±160 лет назад, согласно исследованиям Е.А. Спиридоновой [13]. Данный эпизод для территории бассейна Среднего Дона являлся одним из самых засушливых в голоцене; он сопровождался обезлесением лесостепных ландшафтов и формированием зоны полупустынь на юго-востоке Воронежской области [13]. Почвы, погребенные под курганами возраста 3 700–4 200 лет, изученные юго-восточнее Воронежа [16], на северных отрогах Калачской возвышенности (участок Еланский), а также на юго-востоке Среднерусской возвышенности в Губкинском р-не Белгородской области [17], в своих свойствах отразили данный аридный климатический эпизод. По сравнению с современными черноземами они характеризуются повышенной карбонатностью и укороченностью гумусовых горизонтов и профилей.

## Выводы

Из проведенного исследования вытекают следующие главные выводы:

1. Автоморфные палеочерноземы, формировавшиеся на территории юго-востока Среднерусской возвышенности (лесостепь и север степной зоны) в интервале 3500–3700 и 4300–4600 лет назад, в своих свойствах отразили более влажные климатические условия почвообразования по сравнению с современными обстановками. На это, в частности, указывают формы и обилие карбонатных новообразований в профилях подкурганых черноземов по сравнению с фоновыми почвами. Мощность гумусовых профилей подкурганых черноземов данных хроноинтервалов близко соответствует фоновым черноземам, однако по реконструированным

содержанию и запасам органического вещества древние черноземы превосходили современные аналоги в 1,6–2,6 раза.

2. Учитывая, что выявленные хроноинтервалы относительно влажного климата были разделены эпизодом резкого усиления засушливости климата 4000–4200 лет назад, амплитуда природно-климатических изменений, происходивших на юго-востоке Среднерусской возвышенности в интервале 3500–4600 лет назад (особенно 3700–4300 лет назад), могла быть самой высокой на протяжении голоцена.

### Литература

1. Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М., 2005. 223 с.
2. Геннадиев А.Н. Изменчивость во времени свойств черноземов и эволюция природной среды (Ставропольская возвышенность) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 1984. № 5. С. 10–16.
3. Демкин В.А. Палеопочвоведение и археология: интеграция в изучении природы и общества. Пушино, 1997. 212 с.
4. Иванов И.В. Эволюция почв степной зоны в голоцене. М., 1992. 143 с.
5. Lisetskii F.N., Goleusov P.V., Chepelev O.A. The Development of Chernozems on the Dniester-Prut Interfluvium in the Holocene // Eurasian Soil Science. 2013. Vol. 46, № 5. P. 491–504.
6. Александровский А.Л., Чендев Ю.Г., Трубицын М.А. Палеопочвенные индикаторы изменчивости экологических условий Центральной лесостепи в позднем голоцене // Изв. РАН. География. 2011. № 6. С. 87–99.
7. Чендев Ю.Г., Ершова Е.Г., Александровский А.Л., Пономаренко Е.В., Гольева А.А., Хохлова О.С., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Почвенные и ботанические записи изменения природной среды Ямской степи в голоцене // Изв. РАН. География. 2016. № 2. С. 75–89.
8. Дьяченко А.Г., Михеев В.К., Чендев Ю.Г., Ряполов В.М. Археологические памятники Белгородской области. Вып. 2. Государственный список № 1: регистрационный № 456-680 / Управление культуры администрации Белгородской области. Белгород, 1993. 25 с.
9. Гуляев В.И. Отчет о работе Потуданской археологической экспедиции ИА РАН в 2005 г. // Архив ИА РАН.
10. Березуцкий В.Д. Отчет об охранных раскопках курганов в Воронежской области в 2015 г. // Архив ИА РАН.
11. Bronk Ramsey C., Lee S. Recent and Planned Developments of the Program OxCal // Radiocarbon. 2013. Vol. 55, № 2–3. P. 720–730.
12. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatt C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP // Radiocarbon. 2013. Vol. 55, № 4.

13. Спиридонова Е.А. Эволюция растительного покрова бассейна Дона в верхнем плейстоцене – голоцене. М., 1991. 221 с.
14. Гугалинская Л.А. Морфолитопедогенез центра Русской равнины : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 1997. 44 с.
15. Шевырев Л.Т., Горлов М.Д., Спиридонова Е.А., Тихомиров С.В., Гугалинская Л.А., Алексеева Л.И., Туровский А.И., Поротиков И.Ф. Погребенные почвы Калачской возвышенности // Почвоведение. 1988. № 4. С. 5–18.
16. Ахтырцев Б.П., Ахтырцев А.Б. Изменение гумусного состояния лесостепных и степных черноземов под курганами и при длительной распашке // Почвоведение. 2002. № 2. С. 140–149.
17. Чендев Ю.Г. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М., 2008. 212 с.

### References

1. Aleksandrovskii A.L., Aleksandrovskaya E.I. *Evolutsia pochv i geograficheskaya sreda* [Evolution of soil and the geographical environment]. Moscow, 2005, 223 p.
2. Gennadiev A.N. *Izmenchivost' vo vremeni svoistv chernozemov i evolyutsiya prirodnoi sredy* (Stavropol'skaya vozvyshennost') [Variability in the time of chernozem soils properties and evolution of natural environment (Stavropol Upland)]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5: Geografiya*, 1984, no 5, pp. 55-62.
3. Demkin V.A. *Paleopochvovedenie i archeologia: integratsia v izuchenii prirody i obshestva* [Paleosol science and archeology: integration in study of environment and humanity]. Pushchino, 1997, 212 p.
4. Ivanov I.V. *Evolutsia pochv stepnoi zony v golotsene* [Evolution of soils of the steppe zone during the holocene]. Moscow, 1992, 143 p.
5. Lisetskii F.N., Goleusov P.V., Chepelev O.A. The Development of Chernozems on the Dniester-Prut Interfluvium in the Holocene. *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46, no 5, pp. 491-504.
6. Aleksandrovskii A.L. Chendev Yu.G., Trubitsin M.A. *Paleopochvennye indikatory izmenchivosti ekologicheskikh uslovii Tsentral'noi lesostepi v pozdnem golotsene* [Paleo soil indicators of changes in ecological conditions in the central forest-steppe in late holocene]. *Izv. RAN. Geografiya*, 2011, no 6, pp. 87-99.
7. Chendev Yu.G., Ershova E.G., Aleksandrovskii A.L., Ponomarenko E.V., Gol'eva A.A., Khokhlova O.S., Rusakov A.V., Shapovalov A.S. *Pochvennye i botanicheskie zapisi izmeneniya prirodnoi sredy Yamskoi stepi v golotsene* [Pedological and botanical records of environment changes of Yamsk Steppe in Holocene]. *Izv. RAN. Geografiya*, 2016, no 2, pp. 75-89.
8. D'yachenko A.G., Mikheev V.K., Chendev Yu.G., Ryapolov V.M. *Arkheologicheskie pamyatniki Belgorodskoi oblasti* [Archaeological Monuments of Belgorod Region]. Vol. 2. Belgorod, 1993, 25 p.
9. Gulyaev V.I. *Отчет о работе Потуданской археологической экспедиции Института археологии Российской академии наук в 2005 году* [Report about work of Potudan Archaeological Expedition of the Institute of Archaeology RAS in 2005]. *Архив Института археологии Российской академии наук* [Archive of Institute of Archaeology, RAS].
10. Berezutskii V.D. *Отчет об охранных раскопках курганов в Воронежской области в 2015 году* [Report

- about protected excavations of mounds in Voronezh Region in 2015]. *Arkhiv Instituta arkheologii Rossiiskoi akademii nauk* [Archive of Institute of Archaeology, RAS].
11. Bronk Ramsey C., Lee S. Recent and Planned Developments of the Program OxCal. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, no 2-3, pp. 720-730.
  12. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliadason H., Hajdas I., Hatt C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, no 4.
  13. Spiridonova E.A. *Evolutsiya rastitel'nogo pokrova basseina Dona v verkhnem pleistotsene-golotsene* [Evolution of the plant cover in the Don River Basin in the late pleistocene-holocene]. Moscow, 1991, 221 p.
  14. Gugalinskaya L.A. *Morfolitopedogenez tsentra Russkoi ravniny* : avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk [Morpholithopedogenesis in the Russian plain]. Pushchino, 1997, 44 p.
  15. Shevyrev L.T., Gorlov M.D., Spiridonova E.A., Tikhomirov S.V., Gugalinskaya L.A., Alekseeva L.I., Turovskii A.I., Porotikov I.F. *Pogrebennye pochvy Kalachskoi vozvyshennosti* [Buried Soils of the Kalach Upland]. *Pochvovedenie*, 1988, no 4, pp. 5-18.
  16. Akhtyrtsev B.P., Akhtyrtsev A.B. *Izmenenie gumusnogo sostoyaniya lesostepnykh i stepnykh chernozemov pod kurganami i pri dlitel'noi raspashke* [Changes in the humus state of forest-steppe and steppe chernozems resulting from their long-term plowing and sealing under burial mounds]. *Pochvovedenie*, 2002, no 2, pp. 140-149.
  17. Chendev Yu.G. *Evolutsia lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvyshennosti v golotsene* [Evolution of forest-steppe soils in the Central Russian Upland during the holocene]. Moscow, 2008, 212 p.

УДК 504.53 + 631.416.9

DOI 10.18522/0321-3005-2016-3-110-115

## ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ОКТЯБРЬСКОГО РАЙОНА РОСТОВА-НА-ДОНУ

© 2016 г. Д.Ю. Шишкина, Т.Г. Белая

Шишкина Диана Юрьевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: diana@sfnu.ru

Белая Татьяна Геннадьевна – студентка, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: btg12.1961@gmail.com

Shishkina Diana Yuri'evna – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: diana@sfnu.ru

Belaya Tat'ana Gennad'evna – Student, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: btg12.1961@gmail.com

Приведены основные результаты эколого-геохимического исследования состояния почвенного покрова Октябрьского района г. Ростова-на-Дону. Проанализированы основные особенности и содержание тяжелых металлов в различных функциональных зонах Октябрьского района. Выявлено накопление тяжелых металлов в почвах промышленных и селитебных ландшафтов. Уровень загрязнения почв оценен как допустимый и умеренно опасный.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, функциональные зоны, источники загрязнения, геохимические ассоциации, суммарный показатель загрязнения.

The article presents the main results of the ecological and geochemical research of the state of topsoil of the Oktyabr District of Rostov-on-Don. The content and main features of distribution of heavy metals in the soils from different functional zones of Oktyabr District have been analyzed. The accumulation of heavy metals in the soils of industrial and settlement urban landscapes has been noted. The long-term trends in accumulation of heavy metals in topsoils were identified. The soil pollution level was assessed as acceptable and moderately dangerous.

**Keywords:** heavy metals, functional zones, sources of pollution, geochemical associations, total pollution index.

Эколого-геохимические исследования почвенного покрова проводятся в Ростове-на-Дону с 1980-х гг. За тридцатилетний период накоплен обширный фактический материал, составлены и проанализированы карты распределения тяжелых металлов на всей городской территории и в различных функциональных зонах оконтурены геохимические аномалии и установлен их генезис [1–3].

Преобразования в экономической жизни страны привели к существенному изменению эколого-геохимической ситуации в ряде городов [4, 5]. В Ростове-на-Дону исследования последних лет, в отличие от проводившихся в 1980–1990-х гг., выполняются на локальных участках, что не позволяет охарактеризовать современные тенденции пространственного распределения химических элементов в почвах [6–8]. Для решения этой проблемы целесообразно провести эколого-геохимическую съемку одного из административных районов города.

### Объекты и методы исследований

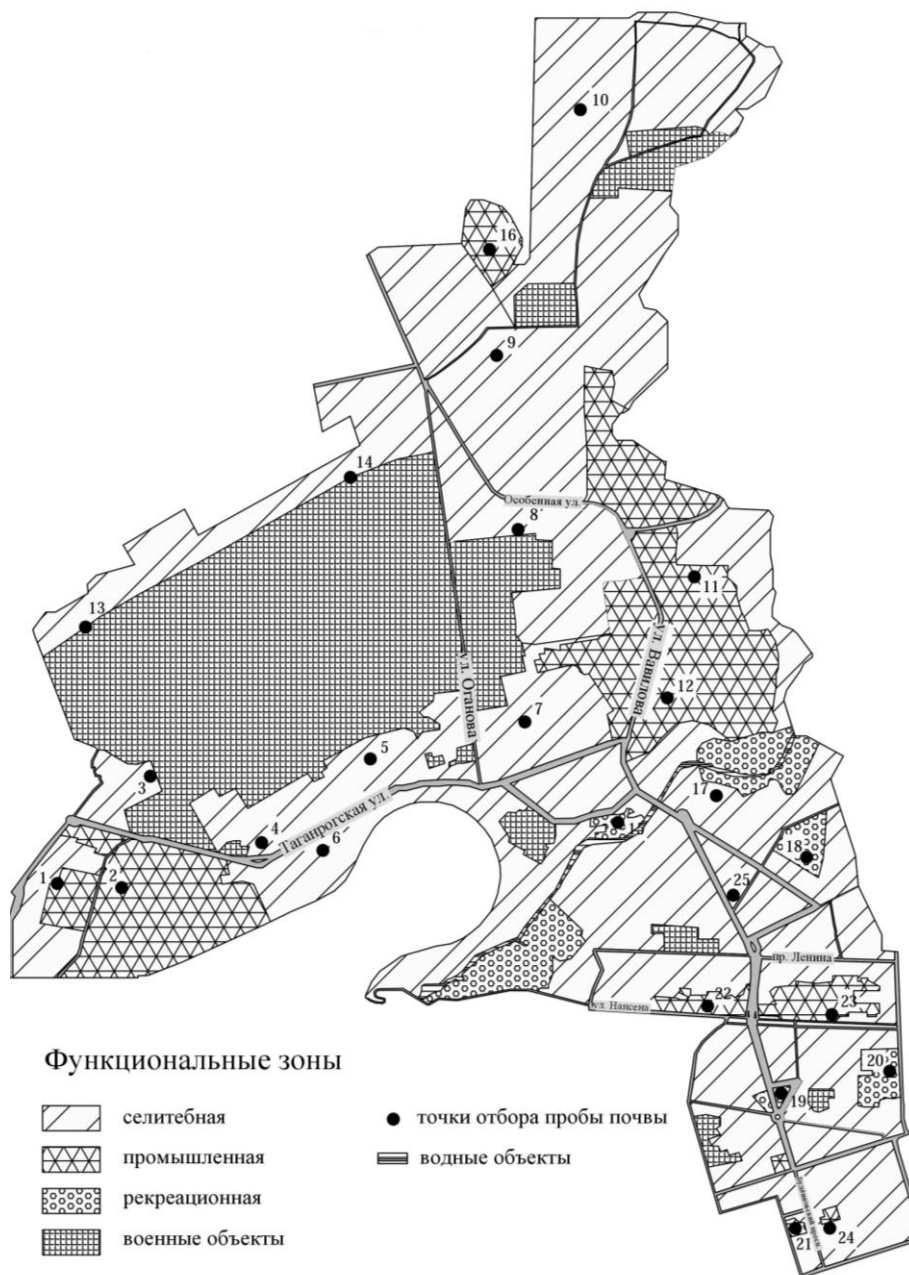
В качестве объекта выбран Октябрьский район – один из наиболее крупных и давно существующих районов Ростова-на-Дону. Его площадь – 49,5 км<sup>2</sup> –

составляет 11,5 % от общегородской; в его границах проживают 167,7 тыс. человек, или 15 % населения Ростова-на-Дону. На территории района представлены все геоморфологические элементы и функциональные зоны города, а также разновозрастные виды застройки – от периферии исторического центра до возникших в недавнее время на месте дачных участков коттеджных посёлков.

Эколого-геохимическое опробование проводилось осенью 2015 г. Сеть проб отбора планировалась с использованием специально составленной схемы функционального зонирования Октябрьского района, что позволило равномерно охватить опробованием все урбандшафты – селитебные, промышленные и рекреационные (рисунок). Всего было отобрано 25 почвенных проб.

Пробы анализировались на содержание тяжелых металлов (Cd, Hg, Mn, Ni, V, Cu, Pb, Zn) и мышьяка. В региональном лабораторном центре ОАО «Южгеология» приближенно-количественным спектральным анализом определены концентрации Mn, Ni, V, Cu, Pb, Zn; в испытательном лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ростовской области» методом атомно-эмиссионной спектроскопии определены Cd, Hg, As.





Функциональное зонирование Октябрьского района и точки отбора проб почвы

Характеристика временной динамики распределения элементов проводилась путем сравнения с данными эколого-геохимических исследований в северо-западной части Ростова-на-Дону, проведенных в 1994 г. [3]. Для эколого-геохимической оценки были использованы такие геохимические коэффициенты и показатели, как коэффициент концентрации и суммарный показатель загрязнения. Коэффициент концентрации ( $K_c$ ) – отношение содержания химиче-

ского элемента в оцениваемом объекте к его фоновому содержанию. Суммарный показатель загрязнения (СПЗ,  $Z_c$ ), позволяющий оценить уровень комплексного загрязнения, представляет собой аддитивную сумму превышений концентраций отдельных элементов над единичным (фоновым) уровнем:

$Z_c = \sum K_c - (n-1)$ , где  $K_c$  – коэффициент концентрации;  $n$  – число химических элементов, входящих в изучаемую ассоциацию.

При  $Z_c < 16$  категория загрязнения оценивается как допустимая;  $16 < Z_c < 32$  – умеренно опасная;  $32 < Z_c < 128$  – опасная;  $Z_c > 128$  – категория загрязнения – чрезвычайно опасная [9].

Для сравнений и расчетов использовались величины регионального фона химических элементов, полученные в ходе многолетних исследований, проводимых сотрудниками кафедры геоэкологии и прикладной геохимии ЮФУ под руководством В.Е. Закруткина [10–13]. Оценка уровня загрязне-

ния выполнена на основе существующих санитарно-гигиенических нормативов [14, 15].

### Результаты исследований

В Октябрьском районе средние содержания большей части изученных элементов в почвенном покрове различных урбандшафтов сопоставимы с региональным фоном. Как видно из табл. 1, концентрации таких химических элементов, как кадмий, марганец и ртуть, заметно ниже фоновых значений.

Таблица 1

Среднее содержание химических элементов в почвах урбандшафтов Октябрьского района, мг/кг

Урбандшафты	Химические элементы								
	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Ni	Cu	Mn	V
Рекреационные	40,0	186,0	0,08	0,008	4,16	52,0	60,0	680,0	160,0
Селитебные	71,5	122,3	0,10	0,009	3,0	54,6	62,3	638,5	165,4
Промышленные	61,4	272,9	0,17	0,009	3,9	47,1	72,9	642,9	127,1
Региональный фон	24,0	84,3	0,22	0,018	2,4	41,0	34,8	725,0	96,0
ПДК (ОДК)	130	220	2,0	2,1	10	80	132	1500	150

Средние концентрации ванадия, меди, свинца, цинка, никеля и мышьяка превышают региональный фон. Максимальное превышение характерно для свинца. Его содержание в почвенном покрове различных урбандшафтов находится в диапазоне от 15 до 600 мг/кг, при этом самое высокое значение в 25 раз превосходит фон (табл. 2). В то же время загрязнение свинцом до 4,6 ОДК выявлено

лишь в двух точках опробования, которые находятся на территории селитебных и промышленных ландшафтов. Наиболее распространенным является загрязнение почв ванадием, концентрации которого превосходят ПДК (150 мг/кг) в семи точках опробования, достигая 200 мг/кг. В пределах селитебных ландшафтов выявлено наибольшее число таких точек – пять.

Таблица 2

Пределы содержания химических элементов в почвах урбандшафтов Октябрьского района, мг/кг

Элементы	Урбандшафты					
	Селитебные		Рекреационные		Промышленные	
	1994	2015	1994	2015	1994	2015
Свинец	20–1000	15–600	20–80	20–80	20–800	20–150
Цинк	60–10000	60–300	100–2000	80–400	60–1000	60–800
Медь	30–500	50–80	20–60	50–80	40–300	50–150
Никель	20–80	40–60	30–60	40–60	30–60	30–60
Марганец	400–3000	500–800	500–1000	600–800	400–2000	500–800
Ванадий	30–150	100–200	30–100	150–200	30–150	60–200
Кадмий	н.опр.*	0,06–0,13	н.опр.	0,05–0,19	н.опр.	0,05–0,17
Ртуть	н.опр.	0,006–0,01	н.опр.	0,007–0,012	н.опр.	0,007–0,01
Мышьяк	н.опр.	2,3–6,5	н.опр.	1,6–8,1	н.опр.	1,7–5,8

\* – н.опр. – содержание химического элемента не определялось

В почвах всех изученных урбандшафтов отмечаются высокие концентрации цинка. Среди рекреационных зон повышенная концентрация цинка характерна для Комсомольского сквера (400 мг/кг); в селитебной зоне максимум данного химического элемента составляет 300 мг/кг; наибо-

лее высокие концентрации (500–800 мг/кг) характерны для промышленных ландшафтов. Аномальные концентрации цинка приурочены в большинстве случаев к магистралям с интенсивным автомобильным движением (пр. Будёновский, ул. Нансена, ул. Шеболдаева).

Содержание меди в почвенном покрове различных урболандшафтов варьирует от 50 до 150 мг/кг. Максимальная концентрация металла приходится на промышленную зону (ул. Нансена), где его содержание превосходит ПДК (132 мг/кг) в 1,14 раза.

Концентрации остальных элементов – кадмия, ртути, мышьяка, никеля, марганца – не достигают санитарно-гигиенических нормативов. Таким образом, почвы Октябрьского района слабо загрязнены тяжелыми металлами. Наиболее широко распро-

странено ванадиевое загрязнение (присутствует в 28 % отобранных проб), далее цинковое (16 %), затем свинцовое (8 %) и медное (4 %).

По величине суммарного показателя загрязнения, который изменяется от 2,2 до 15,6, большинство почвенных проб относится к допустимой категории загрязнения (табл. 3). Значение  $Z_c$  29,8, относящееся к умеренно опасной категории, зафиксировано в единственной точке, расположенной в селитебной зоне по ул. Шеболдаева.

Таблица 3

Суммарный показатель загрязнения почв

Год	Урболандшафты					
	Селитебные		Рекреационные		Промышленные	
	Ср. значение	Пределы	Ср. значение	Пределы	Ср. значение	Пределы
1994	9,6	1,1–139,8	5,0	1,6–24,5	8,3	1,4–34,9
2015	5,9	2,5–29,8	5,4	2,8–10,6	7,3	2,2–15,6

В ходе ретроспективного анализа эколого-геохимической ситуации выявлено значительное снижение концентраций большинства химических элементов в почве за последние 20–25 лет. Так, в 1994 г. среднее содержание цинка во всех урболандшафтах превышало 300 мг/кг, при этом максимальная концентрация составляла 10 000 мг/кг (табл. 2). Судя по карте распределения Zn в почве, построенной по данным 1998 г., на большей части изучаемой территории концентрации элемента находятся в диапазоне 100–300 мг/кг [2].

Основным очагом загрязнения почвы свинцом в 1989 и 1992 гг. назван микрорайон Военвед, где средние концентрации металла составляли 100–200 мг/кг [1]. К 1998 г. содержание Pb снижается и в большинстве проб не превышает 100 мг/кг; на этом фоне в пределах Военведа и Стройгородка выделяются зоны с повышенными концентрациями (100–200 мг/кг) [2]. В настоящее время максимальное содержание свинца в почве в пределах этих микрорайонов не превосходит 80 мг/кг.

Если для цинка и свинца тенденция деконцентрации очевидна, то поведение ванадия не столь однозначно. Педогеохимические аномалии V в 1989 г. располагались на Военведе, где отмечались превышения ПДК в 1,5–2 раза, т.е. содержания достигали 300 мг/кг. В 1992 и 1995 гг. контрастные аномалии ванадия практически исчезли с геохимической карты города, что, по мнению В.В. Приваленко, связано с остановкой многих производственных предприятий и их котельных, а также переводом ТЭЦ на газовое топливо [2]. В настоящее время наблюдается слабый рост содержания ванадия. Его средние концентрации варьируют от 127,1 мг/кг в промышленных ландшафтах до 165,4 мг/кг в селитебных,

при этом максимальные значения не превышают 200 мг/кг (табл. 1, 2).

Динамика эколого-геохимической ситуации обусловлена в первую очередь интенсивностью и характером промышленного производства, характеризующегося ростом в 1970–1980 гг. и спадом в 1990–2000 гг. Спад промышленного производства привёл к уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников и сокращению вклада аэротехногенных потоков в формирование геохимических аномалий. Так, в Ростове-на-Дону выбросы в атмосферу сократились с 43,9 тыс. т в 1988 г. до 12,1 – в 2014 г., а ИЗА<sub>5</sub> (комплексный индекс загрязнения атмосферы) снизился с 22,2 до 4,99. Немаловажным фактором является также вынос некоторых предприятий за пределы города. Снижение уровня загрязнения почв свинцом обусловлено отказом от использования соединений этого элемента в качестве добавки к автомобильному бензину.

### Выводы

1. Почвы разных функциональных зон различаются по уровню содержания химических элементов. Если сравнить средние концентрации металлов и мышьяка с естественным геохимическим фоном, то можно составить следующие геохимические ассоциации:

- селитебные:  $Pb_{3,0}Cu_{1,8}V_{1,7}Zn_{1,5}As_{1,3}Ni_{1,3}$ ;
- рекреационные:  $Zn_{2,2}Pb_{1,7}As_{1,7}Cu_{1,7}V_{1,7}Ni_{1,3}$ ;
- промышленные:  $Zn_{3,2}Pb_{2,6}Cu_{2,1}As_{1,6}V_{1,3}$ .

2. При ранжировании урболандшафтов Октябрьского района по количеству элементов, которые превышают фон, выстраивается следующий

ряд: рекреационные, селитебные > промышленные. По величине коэффициента концентрации выявляется последовательность: промышленные > селитебные > рекреационные.

3. Выявлено слабое локальное загрязнение почв Октябрьского района ванадием, цинком, свинцом и медью. Самым распространенным поллютантом является ванадий; наиболее интенсивное превышение ОДК характерно для свинца.

4. За последние 20–25 лет произошло уменьшение концентраций большинства химических элементов в почвах и снижение уровня комплексного загрязнения.

5. Загрязнение почвенного покрова оценивается как допустимое; выявлен единственный участок с умеренно опасным загрязнением в зоне влияния автомагистрали с интенсивным движением.

### Литература

1. Приваленко В.В., Остроухова В.М., Домбровский Ю.А., Шустова В.Л., Базелюк А.А., Остробородько Н.П. Эколого-геохимические исследования городов Нижнего Дона. Ростов-на-Дону. Ростов н/Д., 1993. 268 с.
2. Приваленко В.В., Безуглова О.С. Экологические проблемы антропогенных ландшафтов Ростовской области. Т. 1: Экология города Ростова-на-Дону. Ростов н/Д., 2003. 290 с.
3. Закруткин В.Е., Скрипка Г.И., Шишкина Д.Ю. Эколого-геохимическая оценка ландшафтов Ростова-на-Дону в зоне влияния РТЭЦ-3 // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 1996. № 3. С. 55–63.
4. Ачкасов А.И., Варавва К.В., Самаев С.Б., Башкаревич И.Л., Трефилова Н.Я. Интенсивность и тенденции изменения химического загрязнения почв Москвы // Геоэкол. проблемы Новой Москвы. М., 2013. С. 65–69.
5. Кайданова О.В., Замотаев И.В., Кудерина Т.М., Курбатова А.Н., Сулова С.Б., Шилькрот Г.С. Современные тенденции распределения тяжелых металлов в городских ландшафтах Курской области // Проблемы региональной экологии. 2014. № 4. С. 54–60.
6. Капралова О.А., Колесников С.И. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на эколого-биологические свойства почв г. Ростова-на-Дону // Науч. мысль Кавказа. 2012. № 1. С. 69–72.
7. Горбов С.Н., Безуглова О.С., Алексикова А.С., Тагивердиев С.С., Дубинина М.Н., Шерстнев А.К. Содержание и распределение тяжелых металлов и мышьяка в почвах Ростова-на-Дону // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4. С. 543.
8. Шишкина Д.Ю. Тяжелые металлы в почвах урбандшафтов г. Ростова-на-Дону // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 2. С. 101–105.
9. СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. М., 2003.
10. Закруткин В.Е. Геохимия ландшафтов и техногенез. Ростов н/Д., 2002. 308 с.
11. Закруткин В.Е., Шишкина Д.Ю., Березуцкий С.В. Ртуть и кадмий в почвах и сельскохозяйственных культурах Ростовской области // Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии юга России и Кавказа : мате-

риалы II междунар. науч. конф. 21–23 октября 1999 г. Новочеркасск, 1999. С. 46–49.

12. Шишкина Д.Ю., Романюк О.Л. Особенности распределения меди, цинка и марганца в агроландшафтах Ростовской области // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды: материалы Всерос. науч. конф. Иркутск, 2007. Т. 1. С. 248–251.
13. Коханюстая Н.В. Влияние сельскохозяйственной деятельности на распределение никеля в почвах Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 3. С. 86–90.
14. ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве : гигиенические нормативы. М., 2006. 15 с.
15. ГН 2.1.7.2511–09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве : гигиенические нормативы. М., 2009. 11 с.

### References

1. Privalenko V.V., Ostroukhova V.M., Dombrovskii Yu.A., Shustova V.L., Bazelyuk A.A., Ostrobord'ko N.P. *Ekologo-geokhimicheskie issledovaniya gorodov Nizhnego Dona. Rostov-na-Donu* [Ecological and geochemical study of the Lower Don cities. Rostov-on-Don]. Rostov-on-Don, 1993, 268 p.
2. Privalenko V.V., Bezuglova O.S. *Ekologicheskie problemy antropogennykh landshaftov Rostovskoi oblasti. T. 1: Ekologiya goroda Rostova-na-Donu* [Ecological problems of anthropogenic landscapes of the Rostov region. Vol. 1: Ecology of the city of Rostov-on-Don]. Rostov-on-Don, 2003, 290 p.
3. Zakrutkin V.E., Skripka G.I., Shishkina D.Yu. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka landshaftov Rostova-na-Donu v zone vliyaniya RTETS-3* [Ecological-geochemical estimation of landscapes of Rostov-on-Don in the zone of influence RHGS-3]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 1996, no 3, pp. 55-63.
4. Achkasov A.I., Varava K.V., Samaev S.B., Bashkarevich I.L., Trefilova N.Ya. [The intensity and trends of chemical contamination of New Moscow soils]. *Geoekol. problemy Novoi Moskvy* [Geoekol. problems of New Moscow]. Moscow, 2013, pp. 65-69.
5. Kaidanova O.V., Zamotaev I.V., Kuderina T.M., Kurbatova A.N., Suslova S.B., Shil'krot G.S. *Sovremennye tendentsii raspredeleniya tyazhelykh metallov v gorodskikh landshaf-takh Kurskoi oblasti* [Modern trends in the distribution of heavy metals in urban landscapes of the Kursk Region]. *Problemy regional'noi ekologii*, 2014, no 4, pp. 54-60.
6. Kapralova O.A., Kolesnikov S.I. *Vliyanie zagryazneniya tyazhelymi metallami na ekologo-biologicheskie svoistva pochv g. Rostova-na-Donu* [Influence of heavy metal pollution on the ecological and biological properties of soils of Rostov-on-Don]. *Nauch. mysl' Kavkaza*, 2012, no 1, pp. 69-72.
7. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Aleksikova A.S., Tagiverdiev S.S., Dubinina M.N., Sherstnev A.K. *Soderzhanie i raspredelenie tyazhelykh metallov i mysh'yaka v pochvakh Rostova-na-Donu* [Content and distribution of heavy metals and arsenic in soils of Rostov-on-Don]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no 4, p. 543.
8. Shishkina D.Yu. *Tyazhelye metally v pochvakh urband-shaftov g. Rostova-na-Donu* [Heavy metals in soils

- urbolandscape of Rostov-on-Don]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 2015, no 2, pp. 101-105.
9. SanPiN 2.1.7.1287-03. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k kachestvu pochvy* [SanPiN 2.1.7.1287-03. Sanitary requirements to the quality of the soil]. Moscow, 2003.
  10. Zakrutkin V.E. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez* [Landscape geochemistry and technogenesis]. Rostov-on-Don, 2002, 308 p.
  11. Zakrutkin V.E., Shishkina D.Yu., Berezutskii S.V. [Mercury and cadmium in soils and crops of Rostov Region]. *Problemy geologii, poleznykh iskopayemykh i ekologii yuga Rossii i Kavkaza* [Problems of geology, mineral resources and ecology of Southern Russia and the Caucasus]. Materials II Intern. scientific conf. October 21-23, 1999. Novocherkassk, 1999, pp. 46-49.
  12. Shishkina D.Yu., Romanyuk O.L. [Features of distribution of copper, zinc and manganese in the agricultural landscapes of the Rostov Region]. *Problemy geokhimii endogennykh protsessov i okruzhayushchei sredy* [Problems geochemistry of endogenous processes and the environment]. Proc. scientific. conf. Irkutsk, 2007, vol. 1, pp. 248-251.
  13. Kokhanistaya N.V. Vliyanie sel'skokhozyaistvennoi deyatel'nosti na raspredelenie nikelya v pochvakh Rostovskoi oblasti [The impact of agricultural activities on the distribution of nickel in soils of the Rostov Region]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki*, 2013, no 3, pp. 86-90.
  14. GN 2.1.7.2041-06. *Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve : gigenicheskie normativy* [GN 2.1.7.2041-06. Maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in the soil: hygienic standards]. Moscow, 2006, 15 p.
  15. GN 2.1.7.2511-09. *Orientirovochno dopustimye kontsentratsii (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve : gigenicheskie normativy* [GN 2.1.7.2511-09. Roughly permissible concentration (APC) of chemicals in the soil: hygienic standards]. Moscow, 2009. 11 p.

1. Материалы, предназначенные для публикации, могут быть представлены по одному из вариантов:

- по электронной почте: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru);
- на диске и бумажном носителе почтой по адресу: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, журнал «Известия вузов. Сев.-Кавк. регион»;
- принесены в редакцию лично по адресу: г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110.

2. К статье прилагаются на отдельном листе на русском и английском языках:

- сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефоны). Если авторов несколько, указать, с кем вести переписку;
- аннотация (500 знаков/10 строк);
- название статьи и фамилии авторов;
- ключевые слова (6–8);
- индекс УДК.

Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой единиц (СИ).

3. Объем статьи – не менее 8 страниц машинописного текста, включая таблицы, список литературы (желательно не менее 10 источников) и рисунки (не более 5).

4. Статья оформляется в формате DOC или DOCX (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Поля со всех сторон – 2,5 см. Использование любых других шрифтов возможно только в виде исключения, с приложением файла шрифта (TTF). Не следует использовать знаки принудительного переноса и дополнительных пробелов.

Для записи формул применять только редактор формул Equation 3.0. При этом формула должна помещаться на половине строки. Большие формулы необходимо разбить на несколько строк, каждая новая строка – новый объект. При наборе формул необходимо придерживаться следующих размеров: текст – 11 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 6 пт, крупный символ – 12 пт, мелкий символ – 10 пт. Формулы не должны включать в состав знаки пунктуации и нумерацию. Векторные величины выделяются прямым полужирным шрифтом. Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Нумеруются только те формулы, на которые имеются ссылки. Нумерация формул – сквозная по всей статье.

5. Таблицы должны иметь заголовки; в них допускаются только общепринятые сокращения. Желательно, чтобы таблица не превышала одной страницы текста. Количество таблиц не может превышать количество страниц.

Рисунки, графики и схемы располагаются в папке «Рисунки». Рисунки и схемы делаются в формате TIF, JPG, черно-белые. Все подписи оформляются отдельными текстовыми файлами с указанием места размещения.

6. Литература приводится в порядке упоминания в конце статьи. В тексте должны быть ссылки в квадратных скобках только на опубликованные материалы. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала. При ссылке на электронный ресурс указывается дата обращения.

7. Также должна прилагаться транслитерация списка литературы. Для русскоязычных статей дополнительно в скобках указать перевод названия на английский язык. Транслитерация (References) – выполняется с помощью программы на сайте <http://translit.net>, выбрать вкладку «Варианты» – BSI.

Библиография должна быть оформлена согласно ГОСТу 7.0.5-2008.

Несоблюдение правил оформления и компьютерного набора рукописи задерживает ее публикацию.

**НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ  
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.  
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

Журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки», имеющий статус центрального издания, включенного в перечень ВАК, продолжает прием работ по следующим отраслям науки:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Физико-математические науки<br>(математика, механика), | Также публикуются материалы в разделах:<br>– заметки о книгах; |
| 2. Общая биология (физико-химическая<br>биология),        | – научная жизнь;   |
| 3. Науки о Земле.   | – штрихи к портрету.   |

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. Помимо основных номеров выходят специальные тематические выпуски, посвященные разным научным направлениям, работам отдельных организаций, а также научные труды вузов, приуроченные к юбилейным датам. С электронной версией журнала можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru).

Публикация материалов, на которые получена положительная рецензия, оплачивается лично автором или организацией. Стоимость работ – договорная.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Статья – 2 экз. В начале статьи указать индекс УДК.
2. Электронный вариант статьи на диске. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office 98 Word 2000, 2003, 2007 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы. Для записи формул применять только редактор формул Equation 3.0.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации.
4. Полное название организации и ее адрес **на русском и английском языках**.
5. Сведения об авторах с указанием адреса, по которому будет вестись переписка **на русском и английском языках**.
6. Название статьи и фамилии авторов **на английском языке**.
7. Реферат **на русском и английском языках** (500 знаков/10 строк).
8. Ключевые слова **на русском и английском языках**.

Журнал распространяется по подписке – через ОАО «Роспечать» в подписной период. Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ.

Редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00 добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru)

Адрес в интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)