

СОДЕРЖАНИЕ

2015. № 3

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

- А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, Л.А. Косолапова, В.Г. Малахов*
Несферическое схлопывание кавитационного пузырька у стенки с переходом
в тороидальную фазу 5
- А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, Н.А. Хисматуллина*
Деформация поверхности тела при ударе водяной струи 12
-

ХИМИЯ

- А.А. Алексеева, И.Г. Шайхиев, С.В. Степанова*
Очистка вод от ионов тяжелых металлов биосорбционными материалами на основе
опада лиственных деревьев 19
- А.Ш. Шаймарданова, С.В. Степанова*
Использование химических реагентов для увеличения сорбционной емкости
листового опада по отношению к ионам железа (II) 31
-

БИОЛОГИЯ, БИОХИМИЯ И ГЕНЕТИКА

- Э.А. Иванова, Г.Х. Вафина, Р.С. Иванов*
Супрамолекулярно-биохимический подход к анализу реорганизации интерфазного
хроматина пшеницы в условиях стресса 36
- Е.А. Девятова, Л.М. Абрамова, О.А. Чернягина*
Адвентивная фракция флоры города Петропавловска-Камчатского 43
- А.В. Крюкова, Л.М. Абрамова*
К биологии редкого вида Республики Башкортостан *Iris scariosa* Willd. ex Link 49
- Д.Ю. Ключников, М.Ю. Языкова, Л.М. Трусова, С.Е. Волчков, О.В. Тюмина*
Получение промегакариоцитов человека в экспериментах *ex vivo* 53
- А.В. Дерюгина, А.А. Мартусевич, Т.А. Веселова*
Молекулярно-клеточные механизмы реализации стресс-реакции организма 58
- А.К. Мартусевич, Л.К. Ковалева, А.А. Мартусевич, С.П. Перетягин, В.И. Карелин*
Влияние длительного курса ингаляций оксида азота на кристаллогенные свойства
сыворотки крови крыс 64
-

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Т.Т. Казанцева

К структурной геологии и перспективам нефтегазоносности
западного склона Южного Урала 70

В.Г. Попов, Р.Ф. Абдрахманов

Геохимия и генезис рассолов Колвинского вала Печорской синеклизы 82

С.Г. Ковалев, С.И. Высоцкий, С.С.Ковалев

Благородные металлы в магматических комплексах Башкирского мегантиклинория
и восточной окраины Восточно-Европейской платформы 90

М.В. Сначёв, А.В. Сначёв

Прогнозные ресурсы золота в углеродистых сланцах Амурского стратиформного
месторождения (Южный Урал) 99

ИСТОРИЯ, АРХЕОЛОГИЯ, ЭТНОЛОГИЯ

А.Б. Юнусова

Мобилизованный архаизм: новые тенденции в традиционной религиозной практике
поклонения башкирских мусульман 106

Г. Иом Дин

Применение метода анализа иерархий в российских и зарубежных исследованиях: обзор ... 116

CONTENTS

2015. № 3

MATHEMATICS AND MECHANICS

- A.A. Aganin, M.A. Ilgamov, L.A. Kosolapova, V.G. Malakhov*
Non-spherical collapse of a cavitation bubble near a wall with transition into the toroidal phase 5
- A.A. Aganin, M.A. Ilgamov, N.A. Khismatullina*
Deformation of the surface of a body under water jet impact 12

CHEMISTRY

- A.A. Alekseeva, I.G. Shaykhiev, S.V. Stepanova*
Removal of heavy metal ions from water using fallen leaves as a biosorbent 19
- A.S. Shaimardanova, S.V. Stepanova*
The use of chemical reagents to increase the sorption capacity of leaf litter in relation to iron (II) ions 31

BIOLOGY, BIOCHEMISTRY AND GENETICS

- E.A. Ivanova, G.H. Vafina, R.S. Ivanov*
Supramolecular and biochemical approach to the analysis of wheat interphase chromatin reorganization under stress 36
- E.A. Devyatova, L.M. Abramova, O.A. Chernyagina*
Adventive fraction in flora of Petropavlovsk-Kamchatsky 43
- A.V. Kryukova, L.M. Abramova*
On the biology of *Iris scariosa* Willd. ex Link, a rare species of the Republic of Bashkortostan 49
- D.Yu. Klyuchnikov, M.Yu. Yazykova, L.M. Trusova, S.E. Volchkov, O.V. Tyumina*
Ex vivo human promegakaryocyte production 53
- A.V. Deryugina, A.A. Martusevich, T.A. Veselova*
Molecular and cellular mechanisms of stress response realization in the organism 58
- A.K. Martusevich, L.K. Kovaleva, A.A. Martusevich, S.P. Peretyagin, V.I. Karelin*
Influence of long-term course of nitric oxide inhalations on crystallogenic properties of rat blood serum 64
-

EARTH SCIENCE

<i>T.T. Kazantseva</i> On structural geology and petroleum potential of the western slope of the South Urals	70
<i>V.G. Popov, R.F. Abdrakhmanov</i> Brine geochemistry and genesis of the Kolva Swell in the Pechora Syncline	82
<i>S.G. Kovalev, S.I. Vysotsky, S.S. Kovalev</i> Noble metals in magmatic complexes of the Bashkir Meganticlinorium and the eastern part of the East European Platform	90
<i>M.V. Snachev, A.V. Snachev</i> Inferred gold resources in carbonaceous shales of the Amur stratiform deposit (South Urals)	99

HISTORY, ARCHEOLOGY, ETHNOLOGY

<i>A.B. Yunusova</i> Mobilizing the past: recent trends in the traditional worship practice of Bashkir Muslims	106
<i>G. Yom Din</i> A survey of the application of the analytic hierarchy process in Russian and foreign studies	116

УДК 532.5.031

НЕСФЕРИЧЕСКОЕ СХЛОПЫВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА У СТЕНКИ С ПЕРЕХОДОМ В ТОРОИДАЛЬНУЮ ФАЗУ

© А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, Л.А. Косолапова, В.Г. Малахов

Рассматривается эволюция кавитационного пузырька вблизи твердой стенки с переходом в тороидальную фазу движения. Жидкость, окружающая пузырек, идеальная несжимаемая, ее течение потенциальное. Реализована численная методика, основанная на шаговом методе отслеживания движения контура во времени и методе граничных элементов, в которой эволюция пузырька делится на два временных периода. Первый продолжается до момента удара возникающей при сжатии кумулятивной струи по противоположной стороне поверхности пузырька, второй включает в себя фазу движения тороидального пузырька, образованного в результате этого удара. Выполнено сравнение с численными и экспериментальными результатами других авторов. Возможности методики иллюстрируются на решении задачи о схлопывании сферического пузырька, первоначально удаленного на небольшое расстояние от стенки.

Ключевые слова: кавитационный пузырек, потенциальное течение жидкости, метод граничных элементов.

Для решения осесимметричной задачи о несферическом схлопывании полости в идеальной несжимаемой жидкости в [1] предложена численная методика, основанная на методе граничных элементов (МГЭ) и используемая позднее во многих работах [2–5]. В этих и ряде других работ расчет проводился до момента удара кумулятивной струи по противоположной стороне поверхности пузырька. Следующим шагом в развитии методики, использующей МГЭ, было ее распространение на последующую тороидальную фазу движения, при которой возникает циркуляция потока жидкости вокруг двухсвязной области пузырька [6–10]. Для учета вращения потока в [6] в струе делается разрез, превращающий область, занимаемую жидкостью, в односвязную и позволяющий использовать МГЭ почти также, как до момента удара. В настоящей работе реализована численная методика для исследова-

ния эволюции кавитационного пузырька у стенки с переходом в тороидальную фазу движения, в основу которой положен подход, описанный в [6]. Проведено сравнение с численными и экспериментальными результатами [8, 11, 12]. Возможности методики показаны на решении задачи о схлопывании сферического пузырька, первоначально удаленного на небольшое расстояние от стенки.

Основные соотношения и методика расчетов. Движение жидкости описывается уравнениями

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

$$\Phi_t + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 + \frac{p - p_\infty}{\rho_f} = 0, \quad (2)$$

где Φ – потенциал скорости, t – время, p – давление, ρ_f – плотность жидкости. Состояние газа в кавитационном пузырьке задается уравнением Ван-дер-Ваальса

АГАНИН Александр Алексеевич – д.ф.-м.н., Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, e-mail: aganin@kfti.knc.ru

ИЛЬГАМОВ Марат Аксанович – чл.-корр. РАН, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, e-mail: ilgamov@anrb.ru

КОСОЛАПОВА Людмила Александровна – к.ф.-м.н., Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, e-mail: kosolapova@kfti.knc.ru

МАЛАХОВ Владимир Георгиевич – к.ф.-м.н., Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, e-mail: malahov@kfti.knc.ru

$$p_b = p_b^0 \left[(1 + \bar{a}) \left(\frac{1 - \bar{b}}{V/V_0 - \bar{b}} \right)^{\kappa} - \bar{a} \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Здесь $\bar{a} = a / (V_0^2 p_b^0)$, $\bar{b} = b / V_0$, V_0 , V – начальный и текущий объемы пузырька, κ – показатель адиабаты, a , b – константы газа.

На поверхности пузырька выполняются динамическое и кинематическое условия

$$p_f = p_b - 2\sigma H, \quad (4)$$

$$d\mathbf{x} / dt = \mathbf{v}, \quad (5)$$

где p_f , p_b – давление со стороны жидкости и пара, σ – коэффициент поверхностного натяжения, H – средняя кривизна, \mathbf{x} , \mathbf{v} – радиус-вектор и скорость точки поверхности ($\mathbf{v} = \nabla\Phi$).

На жесткой стенке ставится условие непротекания

$$v_z = 0. \quad (6)$$

При решении задачи процесс эволюции пузырька разделяется на два периода. Первый завершается в момент контакта конца струи с противоположной стороной поверхности пузырька. Движение поверхности пузырька определяется шаговым методом из кинематического и динамического граничных условий, а скорость точек контура вычисляется с применением МГЭ. В начальный момент второго периода в результате удара струи образуется тороидальный пузырек. Способ численного моделирования перехода от односвязной к двухсвязной тороидальной поверхности пузырька описан в [6]. При этом потенциал скорости определяется неоднозначно. Для устранения этой неоднозначности в область струи вводится бесконечно тонкий прямолинейный разрез, перпендикулярный оси симметрии и соединяющий какую-либо точку сечения тора с осью. Считается, что вдоль этого разреза потенциал скорости терпит разрыв, величина которого постоянна вдоль разреза и равна разности $\Delta\Phi$ значений потенциалов конца струи и точки оси симметрии на противоположной поверхности пузырька. Значение $\Delta\Phi$ определяется по этим значениям в конце первого периода. Таким образом, область течения вновь становится односвязной и методика, используемая на первом периоде эволюции пузырька, применяется и на

втором с той разницей, что в граничном интегральном уравнении появляется дополнительный член, содержащий интеграл по разрезу. При этом интегральное уравнение имеет вид [6]

$$c(x)\Phi(x) = \int_s \left(\frac{\partial\Phi(y)}{\partial n} G(x, y) - \Phi(y) \frac{\partial G(x, y)}{\partial n} \right) ds(y) - \Delta\Phi \int_{T^+} \frac{\partial G(x, y)}{\partial n} ds(y), \quad (7)$$

где $x, y \in S$ – точки наблюдения и интегрирования, S – поверхность тора, исключая разрез, T^+ – верхняя поверхность разреза, Φ – потенциал скорости жидкости, G – функция Грина для полупространства с условием Неймана. Поскольку нормаль в точке пересечения контура разрезом не определена, то интегральное уравнение (7) в ней не записывается, а производная по нормали $\partial\Phi/\partial n$ в этой точке определяется путем линейной интерполяции по значениям в двух соседних точках дискретного разбиения контура. При этом интерполяционная формула замыкает систему линейных уравнений, определяющую значения $\partial\Phi/\partial n$ в точках контура.

Положение разреза на каждом шаге по времени может выбираться произвольно. В настоящей работе разрез выбирался на уровне $z=z_c$, где z_c – осевая координата центра тяжести тороидального пузырька. Далее положение разреза по z не менялось, если смещение центра тяжести сечения тора на последующих шагах не превышало 1/16 его размера вдоль оси вращения. При больших смещениях центра тяжести вдоль оси симметрии вводится новый разрез. При этом значения потенциала на контуре переопределяются путем сложения или вычитания величины $\Delta\Phi$ так, чтобы скачок потенциала оказался на новом положении разреза.

Методика расчета включает также построение полей скорости и давления в жидкости, окружающей пузырек. При этом потенциал Φ определяется из уравнения (7), в котором полагается $c = 1$. Для вычисления ком-

понент скорости применяются конечно-разностные формулы второго порядка точности. Давление в жидкости вычисляется из уравнения (2), где $d\Phi/dt$ также подсчитывается по конечно-разностным формулам.

Значения потенциала, скорости и давления жидкости в точках контура должны незначительно отличаться от значения этих же величин в жидкости в малой окрестности этих точек. Однако из-за наличия особенностей в ядрах уравнения (7), кусочно-линейной аппроксимации контура, а также применения конечно-разностных формул при расчете полей, в близких к контуру точках могут возникать значительные погрешности. Расчеты показывают, что существует узкая полоса жидкости, идущая вдоль контура, на границе которой значения потенциала, скорости и давления, вычисленные в точке этой границы и ближайшей к ней точке контура, близки. В точках внутри полосы по мере приближения к контуру погрешность вычисления сильно возрастает. Численные эксперименты, в которых при различном числе точек разбиения контура пузырька n были рассчитаны поля скорости и давления в точках, находящихся на разном расстоянии от контура, показали, что ширина полосы не превышает длины шага разбиения контура и уменьшается с увеличением n примерно пропорционально этой длине.

При использовании приведенной методики возникает численная неустойчивость, выражающаяся в появлении «пилообразных» высокочастотных искажений формы контура. Для устранения этой неустойчивости применяются различные способы сглаживания [7, 13]. В настоящей работе используется сглаживающий кубический сплайн [14]: некоторая функция f , заданная своими значениями f_i в узлах разбиения дуги контура s_i , аппроксимируется сплайном S_3 , являющимся решением вариационной задачи

$$\int_{s_0}^{s_k} (S_3''(s))^2 ds + \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{w_i} (S_3(s_i) - f_i)^2 \rightarrow \min,$$

где w_i – задаваемые весовые коэффициенты. Сплайн S_3 определяется однозначно при задании двух граничных условий на концах

интервала изменения дуговой координаты контура $s_0 \leq s \leq s_k$. Для тороидальной фазы сплайны строятся на каждом временном шаге для сглаживания функций $r(s)$, $z(s)$ и $\Phi(s)$ с использованием на концах интервала условий периодичности для $r(s)$, $z(s)$ и условий $\Phi''(s_0)=0$, $\Phi''(s_k)=0$ для функции Φ .

Отметим, что задаваемые значения весовых коэффициентов w_i могут существенно влиять на получаемые результаты. Поэтому вычисления проводились для уменьшающихся значений w_i , пока для двух последовательных наборов значений w_i не получатся близкие друг к другу решения. Практика расчетов настоящей работы показала, что для пузырька с характерным размером a безразмерные значения коэффициентов $w_i^* = w_i / a^3$ следует выбирать из интервала $10^{-7} \leq w_i^* \leq 10^{-9}$.

Применение описанного алгоритма может приводить к сильной неравномерности сетки узлов разбиения контура. Этот недостаток устраняется периодической перестройкой сетки.

Сравнение с известными численными и экспериментальными результатами. Рассматривается процесс расширения–сжатия сферического кавитационного пузырька в воде с начальным радиусом R_0 и центром, находящимся на расстоянии d от стенки. Пусть R_{\max} – максимальный радиус сферического пузырька, который достигается при заданной первоначальной положительной разнице давлений $p_b^0 - p_\infty$ в безграничном объеме жидкости (т.е. без стенки). При известных значениях R_0 и R_{\max} начальное давление в пузырьке p_b^0 , требуемое при вычислениях, можно оценить по приближенной формуле, следующей из уравнения Рэлея – Плессета [15]

$$\frac{p_b^0}{(\kappa - 1) p_\infty} = \left(\frac{R_{\max}}{R_0} \right)^3.$$

Далее используются безразмерные величины:

$$R^* = R_0 / R_{\max}, \quad \gamma = d / R_{\max},$$

$$t^* = t / (R_{\max} \sqrt{\rho_f / p_\infty}).$$

Расчет выполнен при следующих значениях параметров: $R^* = 0.1651$, $\gamma = 0.92$, $\kappa = 1.4$,

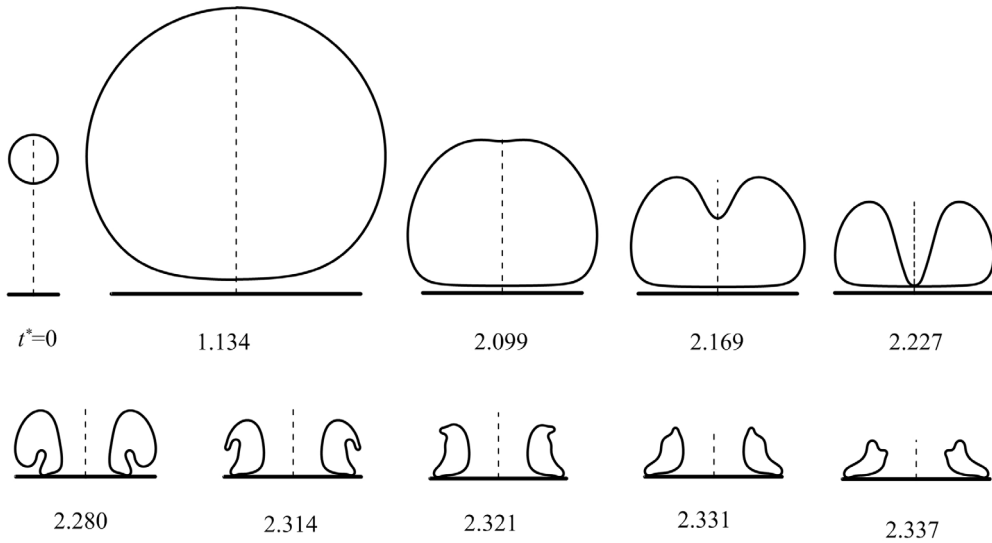


Рис. 1. Формы пузырька в процессе расширения–сжатия до момента касания кумулятивной струи противоположной стенки пузырька (верхний ряд) и на тороидальной фазе движения (нижний ряд) для 10 моментов времени при $\gamma = 0.92$

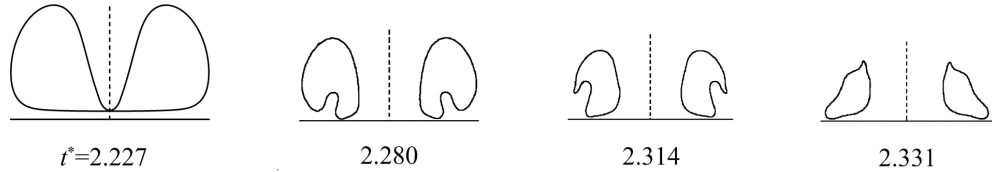


Рис. 2. Формы пузырька в момент t_c^* и в три последующих момента времени на тороидальной фазе движения, полученные в работах [8, 12]

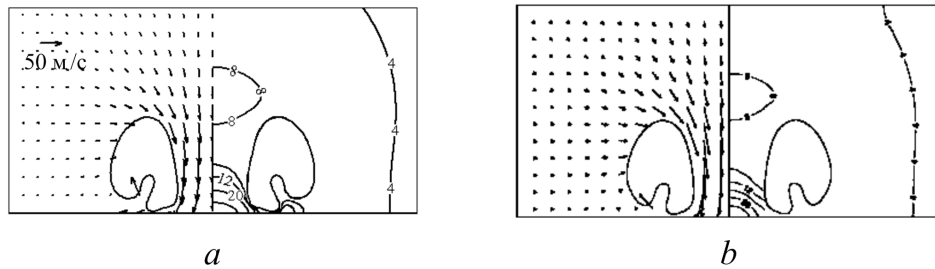


Рис. 3. Поля скорости и давления (бар) в момент $t^* = 2.28$: a – результаты настоящей работы, b – результаты работы [12]

$\sigma = 0$, $\bar{a} = 0$, $\bar{b} = 0$, $p_\infty = 1$ бар [12]. На рис. 1 приведены формы пузырька в последовательные моменты времени. Верхний ряд относится к первому периоду эволюции пузырька, нижний – к ее тороидальной фазе. К моменту $t^* = 1.134$ пузырек максимально расширяется и его объем превышает объем зародыша ($t^* = 0$) в 222 раза. Затем наступает стадия сжатия, в которой наблюдается начало образования ($t^* = 2.099$) и развитие кумулятивной струи до момента $t_c^* = 2.227$ касания струей противоположной части поверхности пузырька и на-

чала тороидальной фазы движения. Следует отметить, что для тороидальной фазы на сравнительно небольшом отрезке времени имеет место значительное изменение формы. На рис. 2 показаны результаты расчетов, полученные в работах [8, 12]. Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что в одинаковые моменты времени формы пузырьков настоящей работы близки к приведенным в [8, 12].

На рис. 3, a, b приведены поля скорости (слева) и давления (справа) в момент $t^* = 2.28$: рис. 3, a – результаты настоящей ра-

боты, рис. 3, *b* – результаты [12]. Здесь также видно хорошее согласование.

Проведено сравнение результатов настоящей работы с результатами, полученными в экспериментах [11, 12]. На рис. 4, *a* показаны формы пузырька при его расширении–сжатии до момента касания конца струи противоположной стенки пузырька t_c^* : верхняя строка – численные результаты, нижняя – эксперимент [11]. Видно хорошее как качественное, так и количественное совпадение результатов. На тороидальной фазе движения сравнение формы пузырька с полученной в эксперименте [12] приведено на рис. 4, *b*. Здесь также видно качественное совпадение фронтальной проекции пузырька.

Иллюстрация применения. При теоретическом изучении динамики пузырька у стенки в литературе иногда рассматривают только сжатие пузырька [2], а иногда и предшествующее ему расширение [8]. С учетом этого для иллюстрации возможностей реализованной методики оценивается влияние поля скорости жидкости, возникающего в конце расширения пузырька, на его последующее сжатие. С этой целью сравниваются два варианта расчетов. В варианте 1 рассматривается расширение и последующее сжатие пузырька, а в варианте 2 – только сжатие. В первом варианте пузырек в начале расширения сферический, его радиус $R^*=0.1$, удаленность от стенки $\gamma=1.25$. Как и выше взято: $\kappa=1.4$, $\sigma=0$, $\bar{a}=0$, $\bar{b}=0$, $p_\infty=1$ бар. Второй вариант отличается от первого тем, что в нем форма пузырька и поле давления в жидкости в начале сжатия берутся такими же, как и в варианте 1 в момент достижения максимального объема, а скорость жидкости принимается нулевой.

На рис. 5 показаны контур пузырька, поля скорости и давления в жидкости и модуль скорости точек контура, полученные в варианте 1 в конце расширения пузырька, когда его

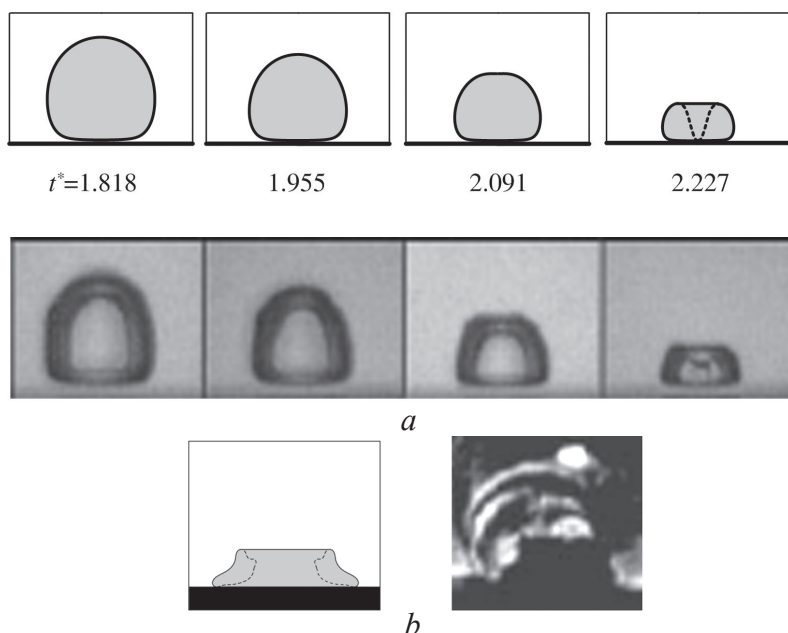


Рис. 4. Сравнение результатов настоящей работы с экспериментами. Формы пузырьков в одинаковые моменты времени: *a* – до момента t_c^* [11], *b* – на тороидальной фазе движения [12]

объем максимален. Видно, что форма пузырька близка к сферической, а величины скорости и давления в окрестности пузырька в этот момент невелики. На рис. 6 приведены формы пузырька в 4 последовательных момента

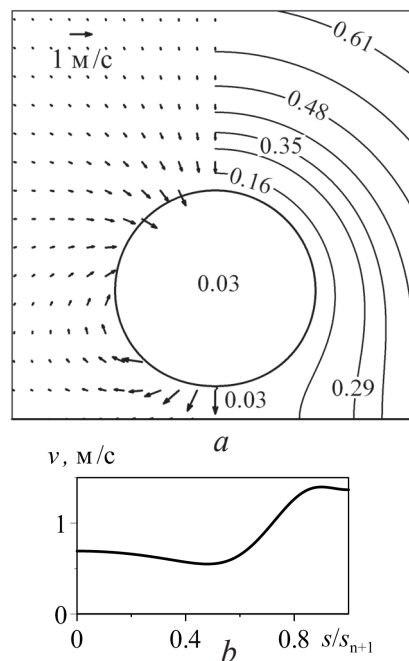


Рис. 5. Форма пузырька и поля давления и скорости окружающей его жидкости (*a*) и модуль скорости точек контура пузырька (*b*) в момент его максимального расширения

времени на стадии сжатия, первый из которых является моментом достижения им максимального объема, второй – моментом касания струи противоположной стенки пузырька и началом тороидальной фазы движения, третий, четвертый – моменты сжатия на тороидальной фазе, когда отношение текущего объема пузырька к объему в момент 2 равно 0.6 (момент 3) и 0.4 (момент 4). Результаты для варианта 1 приведены на рис. 6, *a*, а для варианта 2 – на рис. 6, *b*. Следует отметить, что приведенные формы пузырька в обоих вариантах примерно подобны.

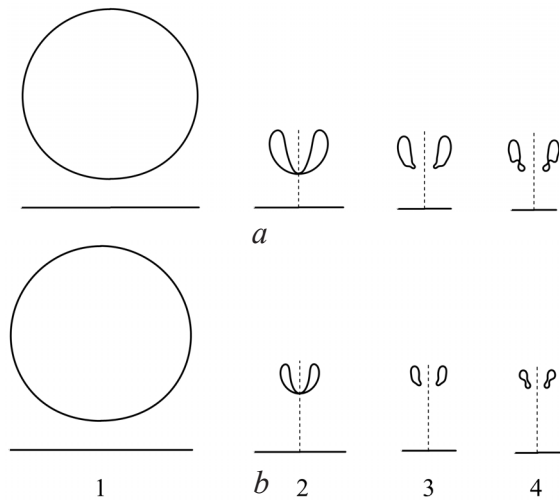


Рис. 6. Изменение формы пузырька при его сжатии: *a* – вариант 1, *b* – вариант 2

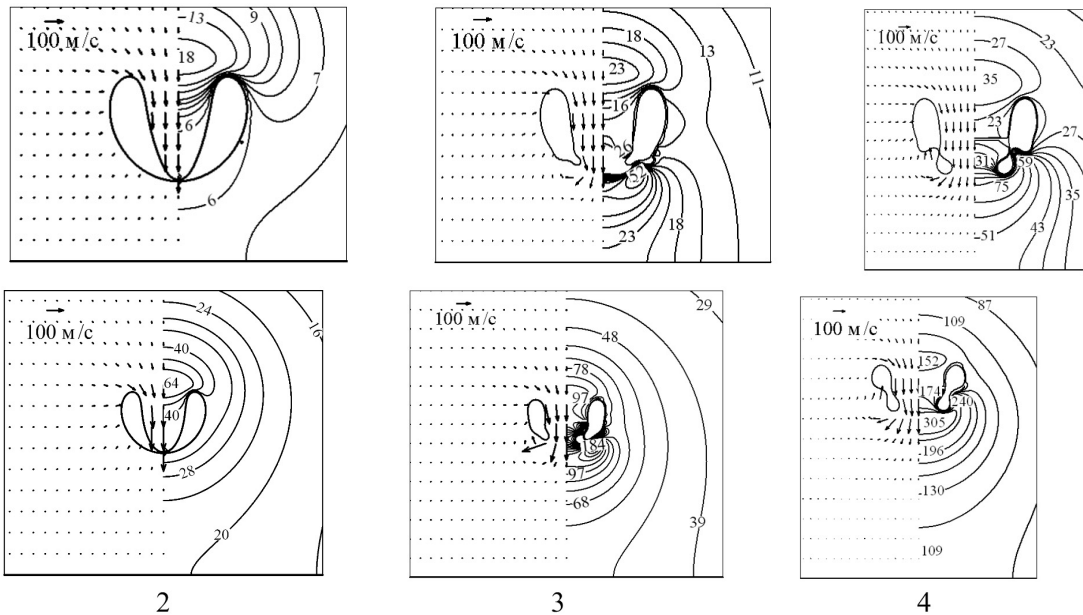


Рис. 8. Поля скорости и давления (бар) в окружающей пузырек жидкости для варианта 1 – верхняя линия, для варианта 2 – нижняя линия в моменты времени 2, 3, 4, соответствующие приведенным на рис. 6

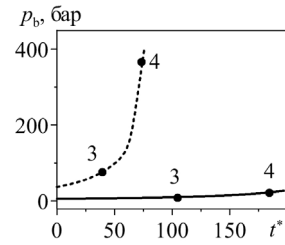


Рис. 7. Давление в пузырьке в зависимости от времени на тороидальной фазе движения: сплошная линия – вариант 1, штриховая линия – вариант 2. Точками отмечено давление для форм 3 и 4, приведенных на рис. 6

Зависимость давления в пузырьке от времени на тороидальной фазе движения для варианта 1 (сплошная линия) и варианта 2 (штриховая линия) изображены на рис. 7. Точками отмечено давление для форм 3 и 4, приведенных на рис. 6. Из рис. 6, 7 видно, что в начале тороидальной фазы движения как объемы пузырьков, так и давление в них в зависимости от варианта задачи существенно различны. Так, давление в пузырьке при ненулевой скорости жидкости, достигнутой в конце стадии расширения, равно 5.3 бар, при нулевой скорости – 36.6 бар, а скорость конца струи отличается в полтора раза: 90.4 и 138.2 м/с соответственно.

На рис. 8 приведены поля скорости и давления в окружающей жидкости на тороидальной фазе движения. Верхний ряд – результаты

для варианта 1, нижний – для варианта 2. Поля в момент начала тороидальной фазы движения (форма 2, рис. 6) даны в крайнем левом столбце, а в моменты, соответствующие формам 3, 4, в центральном и правом столбцах. Видно, что максимальные давление и скорость в момент начала тороидальной фазы в варианте 1 значительно меньше, чем в варианте 2. При дальнейшем сжатии пузырька такое соотношение сохраняется, при этом максимальные значения давления в окружающей пузырек жидкости отличаются в 3–4 раза.

Таким образом, при моделировании сжатия пузырька у стенки даже малая начальная скорость жидкости оказывает существенное влияние на эволюцию пузырька.

Литература

1. Воинов О.В., Воинов В.В. Численный метод расчета нестационарных движений идеальной несжимаемой жидкости со свободными поверхностями // ДАН СССР. 1975. Т. 221, № 3. С. 559–562.
2. Воинов О.В., Воинов В.В. О схеме захлопывания кавитационного пузырька около стенки и образования кумулятивной струи // ДАН СССР. 1976. Т. 227, № 1. С. 63–66.
3. Blake J.R., Taib B.B., Doherty G. Transient cavities near boundaries Part 1. Rigid boundary // J. Fluid Mech. 1986. Vol. 170. P. 479–497.
4. Афанасьев К.Е., Афанасьева М.М., Терентьев А.Г. Исследование эволюции свободных границ при нестационарном движении идеальной несжима-

емой жидкости методами конечных и граничных элементов // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. №5. С. 8–13.

5. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Косолапова Л.А., Малахов В.Г. Схлопывание кавитационного пузырька в жидкости вблизи твердой стенки // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18, вып. 1. С. 15–21.

6. Best J.P. The rebound of toroidal bubbles // Bubble Dynamics and Interface Phenomena. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1994. P. 405–412.

7. Wang Q.X., Yeo K.S., Khoo B.C., Lam K.Y. Nonlinear interaction between gas bubble and free surface // Computers and Fluids. 1996. V. 25, N. 7. P. 607–628.

8. Pearson A., Blake J.R., Otto S.R. Jets in bubbles // J. Engineering Mathematics. 2004. 48. P. 391–412.

9. Brujan E.A., Keen G.S., Vogel A., Blake J.R. The final stage of the collapse of a cavitation bubble close to a rigid boundary // Physics of Fluids. 2002. V. 14, N. 1. P. 85–92.

10. Lee M., Klaseboer E., Khoo B.C. On the boundary integral method for the rebounding bubble // J. Fluid Mech. 2007. V. 570. P. 407–429.

11. Philipp A., Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles // J. Fluid Mech. 1998. V. 361. P. 75–116.

12. Tong R.P., Schiffrers W.P., Shaw S.J., Blake J.R., Emmony D.C. The role of ‘splashing’ in the collapse of a laser-generated cavity near a rigid boundary // J. Fluid Mech. 1999. V. 380. P. 339–361.

13. Zhang Z.Y., Zhang H.S. Surface tension effects on the behavior of a cavity growing, collapsing, and rebounding near a rigid wall // Physical Review E 70, 056310. 2004.

14. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.

15. Brennen C. E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, New-York, 1995. 294 pp.

NON-SPHERICAL COLLAPSE OF A CAVITATION BUBBLE NEAR A WALL WITH TRANSITION INTO THE TOROIDAL PHASE

© A.A. Aganin¹, M.A. Ilgamov², L.A. Kosolapova¹, V.G. Malakhov¹

¹Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, RAS, 2/31, ulitsa Lobachevskogo, 420111, Kazan, Russian Federation

²Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Scientific Centre, RAS, 71, prospekt Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

Consideration is given to the evolution of a cavitation bubble close to a wall with transition into the toroidal phase of motion. The liquid around the bubble is ideal incompressible, its flow being potential. A numerical technique has been realized, based on the stepwise method of tracking the movement of the contour in time and the boundary element method. In this technique, the bubble evolution is divided into two temporal periods. The first one lasts till the moment of impact of the cumulative jet arising in the course of compression on the opposite side of the bubble surface, the second one includes the motion of the toroidal bubble generated as a result of this impact. A comparison with the numerical and experimental results of other authors has been made. The performance capabilities of the technique are illustrated by solving the problem of collapse of a spherical bubble initially slightly distant from a wall.

Key words: cavitation bubble, potential liquid flow, boundary element method.

УДК 539.3

ДЕФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ПРИ УДАРЕ ВОДЯНОЙ СТРУИ

© А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, Н.А. Хисматуллина

Представлены математическая модель и результаты расчетов динамики идеального упруго-пластического тела при приложении к его поверхности нагрузки, возникающей при ударе высокоскоростной струи жидкости с полусферическим концом. Тело моделируется изотропным линейно-упругим полупространством, при описании его пластического состояния используется условие Мизеса. Изучаются особенности деформации поверхности тела в зависимости от его материала. Исследование ведется в осесимметричной постановке задачи. Осью симметрии является ось симметрии струи. Область нагружения представляет собой круг, радиус которого быстро увеличивается от нуля до радиуса струи. Давление в области нагружения не является однородным ни по времени, ни по пространству. В радиальном направлении оно растет от центра к периферии, причем в окрестности центра меняется медленно, а по мере приближения к краю области нагружения скорость роста резко увеличивается. С течением времени давление в центре падает, а на периферии сначала быстро растет, а затем плавно падает. Рассмотрены тела из трех металлических сплавов: алюминиевого, медно-никелевого и из легированной стали. Нагружение поверхности тела во всех трех случаях соответствует удару водяной струи радиуса 100 мкм со скоростью 300 м/с. Показано, что при таком ударе на поверхности тела в центре области воздействия струи возникает наноразмерная вмятина. Радиус вмятины растет вместе с радиусом области нагружения, ее глубина до некоторого момента времени увеличивается, а затем постепенно уменьшается до значений, определяемых остаточными деформациями и имеющих порядок сотен нанометров. Профиль вмятины и ее максимальная глубина зависят от материала тела. Исследовано влияние параметров тела (модуля Юнга, плотности и предела текучести). Показано, что поверхности тел из материалов с низкими значениями модуля Юнга деформируются больше.

Ключевые слова: ударное воздействие струи, упруго-пластическое тело, деформация поверхности.

Введение. Изучение ударного воздействия высокоскоростных струй (и капель) на поверхности тел представляет интерес в связи с эрозией лопаток паровых турбин, обшивок летающих в дождевую погоду самолетов и ракет, лопастей гребных винтов и т.д. [1]. Хотя одиночный удар к видимым изменениям поверхности может и не привести, многократно повторяющиеся удары могут вызвать повреждения. Для понимания природы разрушительного воздействия многократных ударов важно изучить особенности однократного воздействия струи. Этому вопросу посвя-

щено много работ (например, [2–5]), большинство из которых являются экспериментальными. Между тем возможности экспериментального исследования происходящих внутри тела изменений весьма ограничены. Поэтому большое значение приобретает численное моделирование. При этом следует учитывать как особенности нагружения, так и механические свойства материала тела.

При ударе струи жидкость в окрестности области воздействия сначала ведет себя как сжимаемая среда. В результате на поверхности тела возникают нагрузки порядка дав-

АГАНИН Александр Алексеевич – д.ф.-м.н., Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, e-mail: aganin@kfti.knc.ru

ИЛЬГАМОВ Марат Аксанович – чл.-корр. РАН, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, e-mail: ilgamov@anrb.ru

ХИСМАТУЛЛИНА Наиля Абдулхаевна – к.-ф.-м.н., Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, e-mail: nailya_hism@mail.ru

ления гидроудара $p_{wh} = \rho DV$ (ρ – плотность жидкости, D – скорость волны сжатия в жидкости, для воды $D \approx C + 2V$, C – скорость звука в жидкости, V – скорость струи). При $\rho \sim 1000 \text{ кг/м}^3$, $C \sim 1500 \text{ м/с}$, $V \sim 200 \text{ м/с}$ имеем $p_{wh} \sim 400 \text{ МПа}$. Высокие давления порядка p_{wh} удерживаются в промежутке времени порядка времени прохождения волной разрежения расстояния от боковой поверхности струи до ее центра $\tau \sim R/C$ (R – радиус струи). При $C \sim 1500 \text{ м/с}$ и $R \sim 1 \text{ мм}$ имеем $\tau \sim 0.67 \text{ мкс}$ [1]. По истечении времени τ давление на поверхности быстро падает до уровня давления торможения $\rho V^2/2$.

При ударе струи поверхность упруго-пластического тела деформируется, на ней образуется вмятина, иногда с выступом по краям [5]. Если напряжение в теле не достигает предела текучести, то после снятия нагружения поверхность тела восстанавливается. Если же давление на поверхности достаточно велико, то в теле возникают пластические деформации, а когда нагружение снимается, на поверхности сохраняются остаточные повреждения. Для оценки глубины вмятины d можно использовать простую формулу [6] для удара цилиндрической струи жидкости с плоским концом: $d = v\tau$, где v – скорость поверхности тела в центре удара, τ – как и выше, время прохождения волной разрежения расстояния от боковой поверхности струи до ее центра. Для оценки скорости v можно использовать формулу для одномерного случая $v = V[1 + (\rho_0 D_0 / \rho D)]^{-1}$, где ρ_0 – плотность тела, D_0 – скорость волны сжатия в теле. При $R \sim 1 \text{ мм}$, $V \sim 200 \text{ м/с}$, $\rho \sim 1000 \text{ кг/м}^3$, $D \sim 2000 \text{ м/с}$, $D_0 \sim 6000 \text{ м/с}$, $\rho_0 \sim 3000 \text{ кг/м}^3$ получаем $v \sim 20 \text{ м/с}$, а $d \sim 13 \text{ мкм}$.

В настоящей работе численно изучается деформация поверхностей тел из разных металлических сплавов при приложении нагрузки, возникающей при ударе высокоскоростной струи жидкости с полусферическим концом, а также влияние на деформацию поверхности свойств материала тела.

Постановка задачи. Исследуется ударное воздействие на тело высокоскоростной

струи с полусферическим концом, бьющей по телу ортогонально его плоской поверхности. Изменение радиальных профилей давления на поверхности тела $p_L(r,t)$ (r – радиальная координата, отсчитываемая от оси струи, t – время) в ходе воздействия в семь моментов времени t_1 – t_7 показано на рис. 1. Приведенное на этом рисунке давление $p_L(r,t)$ представляет собой сплайн-аппроксимацию по результатам расчетов удара струи по абсолютно жесткой стенке (расчеты выполнены Т.С. Гусевой по методике [7]). Такое давление соответствует водяной струе ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $C = 1500 \text{ м/с}$), имеющей радиус $R = 100 \text{ мкм}$ и скорость $V = 300 \text{ м/с}$. В этом случае время прохождения волной разрежения расстояния от боковой поверхности струи до ее центра $\tau \sim R/C = 47.4 \text{ нс}$ и $t_1 = 0.01\tau$, $t_2 = 0.04\tau$, $t_3 = 0.07\tau$, $t_4 = 0.14\tau$, $t_5 = 0.31\tau$, $t_6 = 0.57\tau$, $t_7 = 2\tau$. Анализ показывает, что для целей настоящей работы погрешности, возникающие в результате пренебрежения обратным воздействием деформаций поверхности тела на характеристики нагружения, при рассматриваемых параметрах струи и характеристиках материала тела являются приемлемыми. На рис. 1 видно, что с течением времени радиус нагруженной области увеличивается, давление в ее центре $r = 0$ относительно медленно убывает, а на периферии сначала довольно резко возрастает до значений, примерно в 3 раза превышающих максимум в центре, а затем плавно падает. В окрестности момента времени $t = 0.07\tau$, при котором давление достигает своего максимума, радиальное распределение сильно неоднородно.

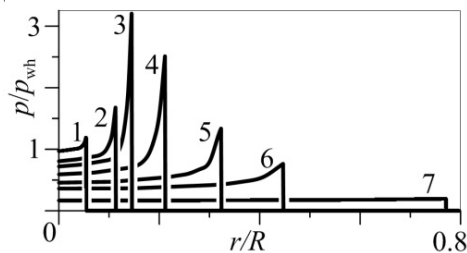


Рис. 1. Радиальные профили давления на поверхности тела в семь последовательных моментов времени t_1 – t_7 (кривые с соответствующими номерами)

Механические характеристики сплавов

Сплав	E (ГПа)	ν	ρ (кг/м ³)	Y_0 (МПа)
Д16Т	71	0.34	2700	325
Монель 400	173	0.3	7850	250
30ХЗМФ	210	0.3	7850	835

Деформация поверхности тела определяется четырьмя независимыми параметрами: модулем упругости E (модулем Юнга), коэффициентом Пуассона ν , плотностью ρ и пределом текучести Y_0 [8]. Для настоящей работы представляют интерес материалы, которые часто используются для изготовления контактирующих с водой деталей или их защитного покрытия. Поэтому выбраны тела из трех различных металлических сплавов: алюминиевого Д16Т, монеля 400 (медно-никелевый сплав), легированной стали 30ХЗМФ. Их механические характеристики приведены в табл. 1.

Параметры этих металлов различаются между собой достаточно сильно, что позволяет оценить их влияние по отдельности на деформацию поверхности тел.

Тело считается упруго-пластическим изотропным полупространством. Деформации и перемещения в теле полагаются малыми, что допустимо при рассматриваемом нагружении.

Динамика тела описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial(S_{rr} - P)}{\partial r} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \frac{S_{rr} - S_{\varphi\varphi}}{r}, \\ \frac{\partial S_{zz}}{\partial t} &= -\frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} - 2\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} \right), \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial(S_{zz} - P)}{\partial z} + \frac{S_{rz}}{r}, \\ \frac{\partial S_{rr}}{\partial t} &= \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u}{r} \right), \\ \frac{\partial S_{rz}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial S_{\varphi\varphi}}{\partial t} &= -\frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} - 2\frac{u}{r} \right), \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= -K \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь z – осевая координата; u, v – компоненты скорости по осям цилиндрических коор-

динат r и z соответственно; $S_{rr}, S_{zz}, S_{\varphi\varphi}, S_{rz}$ – компоненты девиатора S тензора напряжений σ ; $S = \sigma + Pg$, P – всестороннее (гидростатическое) давление, g – метрический тензор, $\lambda = E\nu(1+\nu)/(1-2\nu)$ и $\mu = 0.5E/(1+\nu)$ – параметры Ламе, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, ρ – невозмущенная плотность тела.

В пластических зонах выполняется условие текучести Мизеса $\sigma_i = Y_0$, где

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + 6\tau_{rz}^2}$$

– интенсивность напряжений, Y_0 – предел текучести материала тела. Если условие текучести нарушается, т.е. если σ_i в некоторой точке превышает предел текучести, то девиатор тензора напряжений корректируется

$$S_{corr} = \frac{Y_0}{\sigma_i} S.$$

За начальный момент времени $t = 0$ принимается момент касания струи поверхности тела. В начальный момент деформации в радиальном и окружном направлениях отсутствуют, реализуется статическое напряженное состояние

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -p_0, & \sigma_r &= \sigma_\varphi = -\lambda(\lambda + 2\mu)^{-1} p_0, \\ \tau_{rz} &= 0, & u &= v = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

На поверхности тела $z = 0$ полагается

$$\sigma_z = -p_L(r, t), \quad \tau_{rz} = 0. \quad (3)$$

На бесконечном удалении от места приложения нагрузки параметры тела остаются невозмущенными.

Задача (1)–(3) решается численно классическим методом С.К. Годунова [9]. Подробное описание методики расчета и иллюстрацию ее применения можно найти в [10, 11]. Отметим лишь, что бесконечная область тела заменяется в методике конечной цилиндри-

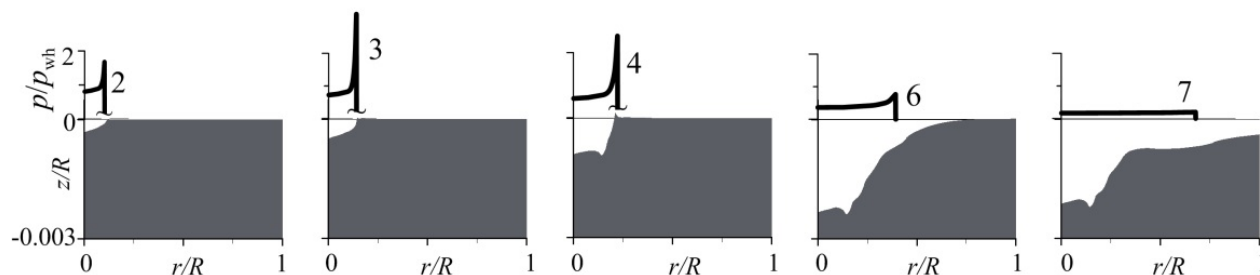


Рис. 2. Деформация поверхности тела из монеля при ударе струи с полусферическим концом в пять характерных моментов времени, нумерация которых соответствует нумерации на рис. 1

ческой областью с искусственными границами, на которых ставятся неотражающие условия [12].

Деформация поверхности тела при ударе струи

1. Влияние материала

тела. Динамика поверхности упруго-пластического тела при ударе струи с полусферическим концом на примере тела из монеля иллюстрируется на рис. 2. Отметим, что на этом и последующих рисунках масштабы в радиальном и осевом направлениях сильно различаются (картинка сильно растянута вдоль оси z). Нумерация моментов времени соответствует нумерации на рис. 1. Видно, что в результате удара на поверхности тела появляется небольшое углубление (вмятина), центр которого совпадает с центром области нагружения. Со временем радиальные размеры вмятины возрастают (в ее более выраженной части до $0.03R$), а ее глубина к моменту t_6 увеличивается (примерно до $0.002R$), а затем несколько уменьшается.

На рис. 3, a показаны профили поверхностей тел из трех рассматриваемых сплавов

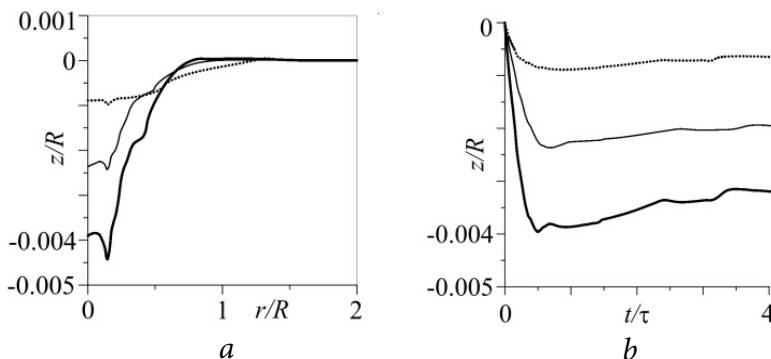


Рис. 3. Профили вмятин на поверхности металлических тел в момент их максимальной глубины (a) и изменение осевого положения центральных точек профилей в процессе деформирования (b). Жирная сплошная кривая соответствует алюминиевому сплаву, тонкая сплошная – монелю, пунктирная – легированной стали

в момент максимальной глубины вмятины, а на рис. 3, b – изменение осевого положения их центральных точек в процессе деформирования. Видно, что наибольшая вмятина возникает на поверхности тела из алюминиевого сплава. Максимальная глубина вмятины в теле из алюминиевого сплава в 1.8 раза больше, чем у тела из монеля, и в 4.5 раза больше, чем у тела из стали.

В табл. 2 приведены полученные при численном моделировании максимальная глубина вмятины, ее остаточная глубина и оценка остаточной глубины по указанной во введении формуле $d = v\tau$ [6], в которой при вы-

Т а б л и ц а 2

Сравнение расчетной глубины вмятины с ее теоретической оценкой

Материал тела	Максимальная глубина вмятины (мкм)	Остаточная глубина вмятины (мкм)	Оценка остаточной глубины вмятины $d = v\tau$ (мкм)
Д16Т	0.44	0.38	1.52
Монель 400	0.24	0.20	0.8
30Х3МФ	0.1	0.08	0.6

числении скорости v принято $D_0 \approx c_1$. Видно, что оценка остаточной глубины вмятины по формуле $d = v\tau$ оказывается завышенной для тел из алюминиевого сплава и монеля в 4 раза, а для тела из легированной стали – в 7.5 раз. Оценка $d = v\tau$ получена в предположении, что пластические деформации в теле возникают в самом начале удара и затем продолжают в течение времени τ . При рассматриваемой скорости струи $V = 300$ м/с у тел из алюминиевого сплава и монеля пластические деформации появляются сразу при ударе, а у тела из легированной стали – лишь спустя $\approx 0.04\tau$ после начала удара. По-видимому, это является одной из причин того, что для легированной стали оценка $d = v\tau$ оказывается наиболее далекой от результатов численного моделирования.

Таким образом, формулу $d = v\tau$ можно применять лишь для оценки порядка величины остаточной глубины вмятины.

2. Влияние механических характеристик материала

Для исследования влияния отдельных механических характеристик материала тела (E, ρ, Y_0) на деформацию его поверхности проводится сравнение результатов расчетов для тела из алюминиевого сплава и тел из гипотетических материалов с характеристиками алюминиевого сплава, за исключением исследуемой характеристики, величина которой варьируется в диапазоне значений, приведенных в табл. 1. Влияние коэффициента Пуассона ν не рассматривается, поскольку его значение у изучаемых материалов различается незначительно.

На рис. 4 представлены результаты расчетов для $E = 71$ (как у алюминиевого сплава), 140 и 210 (как у легированной ста-

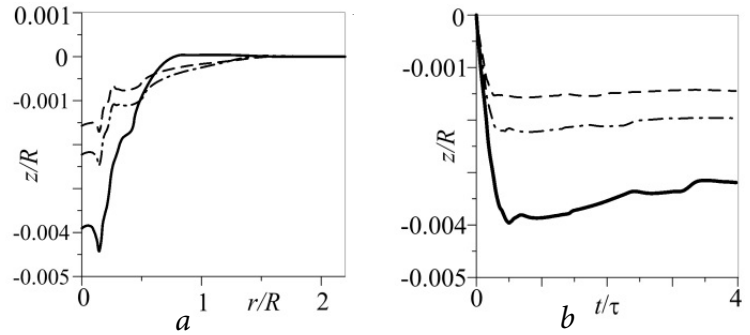


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для тел с характеристиками алюминиевого сплава, за исключением модуля Юнга. Сплошная жирная линия соответствует $E = 71$ ГПа, штрихпунктирная – $E = 140$ ГПа, штриховая – $E = 210$ ГПа

ли) ГПа. Видно (рис. 4, a), что с ростом модуля Юнга вмятина сильно уменьшается. По сравнению с телом из алюминиевого сплава ее максимальная глубина становится меньше в 1.8 раз при $E = 140$ ГПа и в 2.6 раз при $E = 210$ ГПа. На рис. 4, b видно, что увеличение E приводит также к заметному уменьшению скорости роста глубины вмятины после достижения ею своей максимальной величины.

На рис. 5 приведены результаты расчетов для $\rho = 2700$ (как у алюминиевого сплава), 5300 и 7850 (как у легированной стали) кг/м^3 . Видно, что, как и в случае с модулем Юнга, с ростом плотности вмятина уменьшается. Вместе с тем здесь она уменьшается не столь значительно. Так, ее максимальная глубина при увеличении ρ от 2700 до 5300 кг/м^3 уменьшается в 1.16 раз, а при увеличении до 7850 кг/м^3 – в 1.3 раза. На рис. 5, b видно, что повышение ρ слабо сказывается на скорости роста глубины вмятины после достижения ею своего максимума.

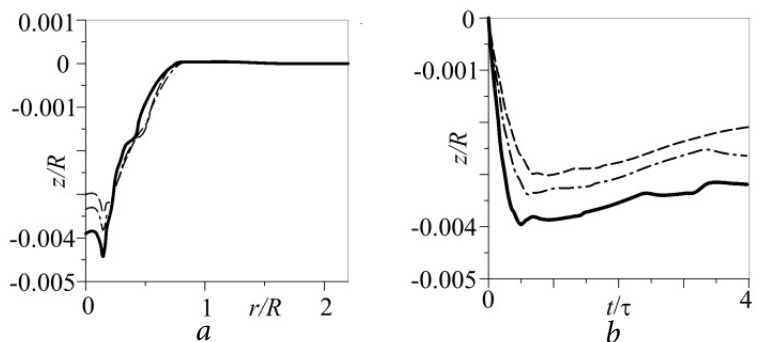


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, но для тел с характеристиками алюминиевого сплава, за исключением плотности. Сплошная жирная линия соответствует $\rho = 2700$ кг/м^3 , штрихпунктирная – $\rho = 5300$ кг/м^3 , штриховая – $\rho = 7850$ кг/м^3

В одномерном случае деформация обратно пропорциональна произведению плотности и модуля Юнга. Поэтому одинаковые изменения этих параметров приводят к одному и тому же результату. Отмеченное выше различие деформаций поверхности тела при аналогичном увеличении плотности и модуля Юнга тела можно объяснить двумерными эффектами. Это означает, что одномерные оценки нельзя использовать для прогноза особенностей рассматриваемой динамики осесимметричного тела.

На рис. 6 приведены результаты расчетов для $Y_0 = 250$ (как у монеля), 325 и 835 (как у легированной стали) МПа. Видно, что с уменьшением предела текучести вмятина растет. Так, по сравнению со случаем $Y_0 = 325$ МПа ее максимальная глубина при $Y_0 = 250$ МПа больше в 1.3 раза, а при $Y_0 = 835$ МПа меньше в 1.6 раза.

Сравнение деформации поверхности тела из монеля (рис. 3, тонкие сплошные кривые) с деформацией поверхности гипотетического тела с параметрами алюминиевого сплава, но с пределом текучести монеля (рис. 6, штрихпунктирные кривые) показывает, что максимальная глубина вмятины оказывается в случае монеля в 2.4 раза меньше. В этих двух случаях материалы различаются значениями плотности и модуля Юнга. Как показано выше, изменение плотности относительно мало влияет на деформацию поверхности тела. Поэтому можно заключить, что модуль Юнга влияет на деформацию поверхности тела больше, чем предел текучести.

Заключение. Выполнено исследование влияния механических характеристик идеального упруго-пластического тела (плотности, модуля Юнга и предела текучести) на величину возникающей на его поверхности при ударе высокоскоростной струи жидкости с полусферическим концом. Установлено, что наибольшее влияние оказывает модуль Юнга материала тела (в частности, чем больше значе-

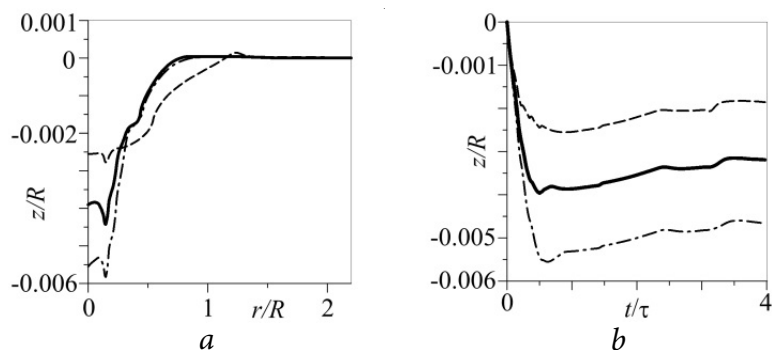


Рис. 6. То же, что и на рис. 3, но для тел с характеристиками алюминиевого сплава, за исключением предела текучести. Сплошная жирная линия соответствует $Y_0 = 325$ МПа, штрихпунктирная – $Y_0 = 250$ МПа, штриховая – $Y_0 = 835$ МПа

ние модуля Юнга, тем меньше глубина вмятины), а наименьшее – его плотность.

Авторы благодарны Т.С. Гусевой за расчет нагрузки.

Литература

1. Field J. E. ELSI conference: invited lecture: Liquid impact: theory, experiment, applications // *Wear*. 1999. V. 233. P. 1–12.
2. Воинов О.В., Воинов В.В. О схеме захлопывания кавитационного пузырька около стенки и образования кумулятивной струи // *ДАН СССР*. 1976. Т. 227, № 1. С. 63–66.
3. Tomita Y., Shima A. Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse // *J. of Fluid Mechanics*. 1986. V. 169. P. 535–564.
4. Choi J.-K., Jayaprakash A., Kapahi A., Hsiao C.-T., Chahine G.L. Relationship between space and time characteristics of cavitation impact pressures and resulting pits in materials // *J. of Materials Science*. 2014. V. 49. P. 3034–3051.
5. Bowden F.P., Brunton J.H. The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds // *Proceedings of the Royal Society A*. 1961. V. 263. P. 433–450.
6. Lush P.A. Impact of a liquid mass on a perfectly plastic solid // *J. of Fluid Mechanics*. 1983. V. 135. P. 373–387.
7. Аганин А.А., Гусева Т.С. Численное моделирование динамики неоднородных сжимаемых сред на основе метода CIP-CUP на адаптивных soroban-сетках // *Ученые записки Казанского университета*. 2014. Т. 156, кн. 2. С. 55–72.
8. Fortes-Patella R., Challier G., Reboud J. L., Archer A. Energy balance in cavitation erosion: from bubble collapse to indentation of material surface // *J. of Fluids Engineering*. 2013. 135(1). P. 011303-1–011303-11.

9. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

10. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Хисматуллина Н.А. Упруго-пластические деформации в теле при ударном воздействии кавитационного пузырька // Ученые записки Казанского университета. 2013. Т. 155, кн. 2. С. 131–143.

11. Аганин А.А., Хисматуллина Н.А. Ударное воздействие струи жидкости на упруго-пластическое тело // Ученые записки Казанского университета. 2014. Т. 156, кн. 2. С. 72–86.

12. Ильгамов М.А., Гильманов А.Н. Неотражающие условия на границах расчетной области М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 240 с.



DEFORMATION OF THE SURFACE OF A BODY UNDER WATER JET IMPACT

© A.A. Aganin¹, M.A. Ilgamov², N.A. Khismatullina¹

¹Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, RAS,

2/31, ulitsa Lobachevskogo, 420111, Kazan, Russian Federation

²Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Scientific Centre, RAS,

71, prospekt Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

The paper presents a mathematical model and computational results on the dynamics of a perfect elastic-plastic body under the load arising during impact of a high-velocity liquid jet with hemispherical end. The body is simulated by isotropic linearly elastic semi-space, its plastic state is described using von Mises condition. Features of the body surface deformation are studied in relation to the body material. The problem is considered in the axisymmetric statement. The axis of symmetry is the same as that of the jet. The load domain is a circle with its radius rapidly growing from zero to the jet radius. The pressure in the load domain is not uniform both in time and space. It increases in radial direction from the centre to the periphery, varying slowly near the centre. The rate of the pressure increase grows up strongly on approaching the edge of the load domain. With time the pressure in the centre decreases while at the periphery it rapidly grows at first and then smoothly decreases. Three metal alloys (aluminum, copper-nickel and steel) as the body material are considered. The loading of the body surface in all cases corresponds to the impact of a water jet with radius 100 mm and velocity 300 m/s. It has been shown that under such an impact a nanopit arises on the body surface at the centre of the domain of the jet action. The pit expands together with the load domain, its depth increases till some moment and then gradually decreases up to the values on the order of hundreds of nanometres due to residual deformations. The profile of the pit and its maximal depth depend on the body material. The influence of the body parameters (Young modulus, density and yield strength) is studied. It has been shown that the surfaces of the bodies of the materials with low Young modulus are deformed to a greater extent.

Key words: jet impact, elastic-plastic body, body surface deformations.

УДК 628.316.12

ОЧИСТКА ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ БИОСОРБЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ОПАДА ЛИСТВЕННЫХ ДЕРЕВЬЕВ

© А.А. Алексеева, И.Г. Шайхиев, С.В. Степанова

В обзорной статье обобщены литературные сведения по использованию листьев различных видов деревьев в качестве сорбционных материалов для удаления ионов тяжелых металлов из водных сред. Показано, что сорбционные характеристики данного материала, как и степень удаления ионов металлов, зависят от условий проведения сорбции и от вида деревьев. Под условиями проведения процесса понимаются: начальная концентрация иона металла, температура, pH, продолжительность контактирования. Выявлено, что максимальная сорбционная способность для большинства деревьев достигается при уровне pH 4–7, но в редких случаях, в частности для удаления Cr(VI), при pH 2. В некоторых исследованиях приводятся термодинамические параметры процесса сорбции, которые объясняют механизм процесса. Так, определено, что изотермы сорбции ионов металлов описываются в основном уравнениями Фрейндлиха и Ленгмюра, реже – Дубинина – Радужкевича и Темкина. Показано, что большинство публикаций посвящено удалению из водных сред токсичных ионов Cd(II), Cr(VI), Cu(II) и Pb(II). При литературном поиске выявлено, что лиственный опад может быть использован и для удаления ионов редких металлов из водных сред, а также извлечения ионов драгоценных металлов, которые затем можно экстрагировать термическими методами. Наибольшие сорбционные показатели по удалению ионов металлов наблюдались у листьев деревьев Омела (*Viscum*), Тиковое дерево (*Tectona grandis*), а наибольшее количество публикаций в литературе посвящено сорбции с использованием листьев деревьев Ним (*Azadirachta indica*), Джамболан (*Syzygium cumini*), Мушмула японская (*Eriobotrya japonica*). Доказано, что модифицирование древесных листьев с помощью химической обработки различными реагентами улучшает сорбционные свойства и увеличивает степень очистки загрязненных вод.

Ключевые слова: ионы тяжелых металлов, листья, очистка, сорбционная емкость.

Введение. В настоящее время загрязнение окружающей природной среды различными поллютантами, в том числе ионами металлов, представляет большую опасность для биосферы. Помимо непосредственного токсического действия на живые и растительные организмы, ионы металлов имеют тенденцию к накоплению в пищевых цепях, что усиливает их опасность для человека. Попадая в водоемы, они длительное время находятся в наиболее опасной ионной форме, и, даже переходя в связанное состояние (коллоидную форму, донные осадки или другие ма-

норастворимые соединения), продолжают представлять потенциальную угрозу для биологических объектов.

Существует много различных химических, физико-химических и биологических способов извлечения ионов металлов из водных сред. Как показывает обзор мировой литературы, в настоящее время одним из наиболее эффективных методов удаления поллютантов из водных сред является сорбционный. Особая ценность данного метода заключается в том, что в качестве сорбционных материалов можно использовать отходы про-

АЛЕКСЕЕВА Анна Александровна, Казанский научно-исследовательский технологический университет, e-mail: annank90@mail.ru

ШАЙХИЕВ Ильдар Гильманович – д.т.н., Казанский научно-исследовательский технологический университет, e-mail: ildars@inbox.ru

СТЕПАНОВА Светлана Владимировна – к.т.н., Казанский научно-исследовательский технологический университет, e-mail: ssvkan@mail.ru

мышленного производства и от переработки сельскохозяйственной продукции, а также природную растительную биомассу.

В мировой литературе имеется большое количество публикаций, посвященных удалению поллютантов из водных сред отходами деревопереработки, как правило, опилками [1]. В то же время весьма перспективным сорбционным материалом является листва деревьев.

Большое количество иностранной литературы в области использования древесных листьев в качестве сорбента по отношению к ионам тяжелых металлов свидетельствует об актуальности темы и возможности технического использования данного вида сорбции. В настоящей работе кратко обобщены литературные сведения по удалению ионов металлов из водных сред с использованием листьев деревьев.

Простой лист состоит из единственной листовой пластинки и одного черешка. В зависимости от видов деревьев их листья могут быть простыми или сложными, иметь различную форму, жилкование, но внутреннее строение у всех одинаково. Лист дерева состоит из внешней кожицы, устьица и основной ткани. Верхняя кожица (эпидерма) – покровная ткань

на обращенной стороне листа, часто покрытая волосками, кутикулой. Устьице – щель, окруженная клетками, через которую воздух поступает к внутренним клеткам листа; через них же газообразные вещества, в том числе и пары воды, выходят из листа наружу. К основным тканям листа относятся: столбчатая ткань, клетки которой имеют цилиндрическую форму, плотно прилегают друг к другу и расположены с верхней стороны листа (обращенной к свету); губчатая ткань, клетки которой имеют округлую форму, расположены рыхло, и между ними образуются крупные межклетники, заполненные воздухом.

По сосудам листа, так же как и в корне, движется вода с растворенными в ней минеральными веществами. Затем из корней по сосудам древесины эти вещества поступают в надземные органы, в том числе и к клеткам листа.

В состав многочисленных жилок входят волокна, а также крупные жилки листа, окруженные механической тканью, которая целиком состоит из толстостенных клеток – самих волокон.

Нижняя кожица – покровная ткань с нижней стороны листа – обычно несет устьица [2]. На рис. 1 показан разрез листовой пластинки.

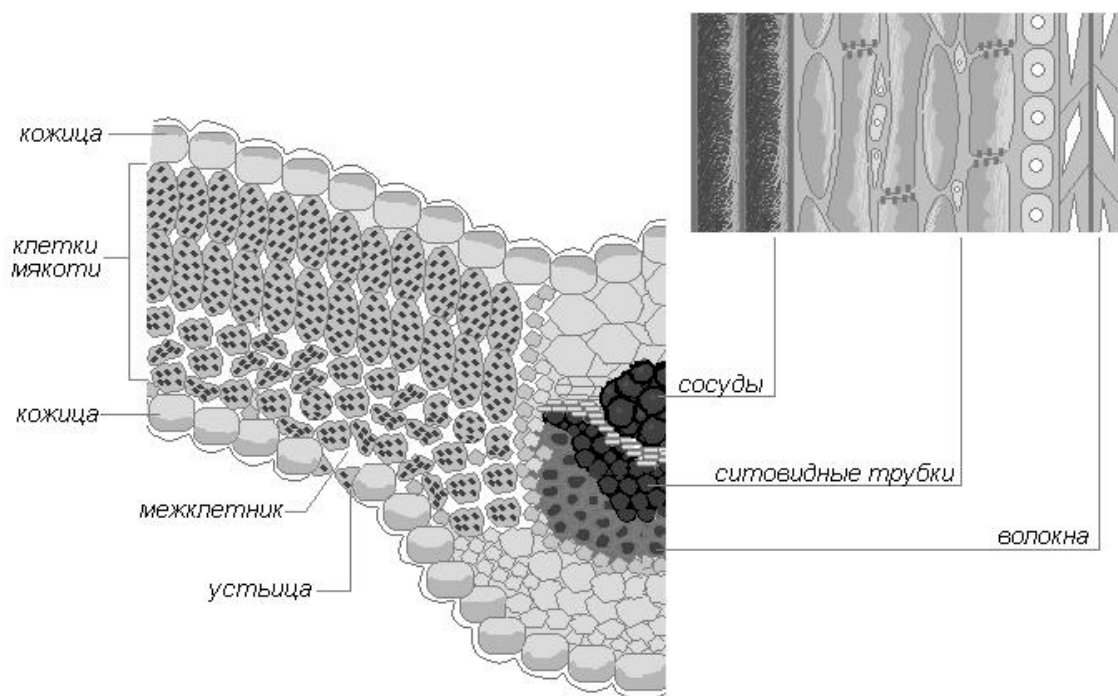


Рис. 1. Поперечный разрез листовой пластинки

Химический и элементарный состав листьев, а также некоторые элементы, находящиеся в составе листьев, зависят от места произрастания, т.к. часто являются биоиндикаторами

для мониторинга окружающей среды. В табл. 1 приведены сведения о составе листьев *Betula pendula* и *Pópulus trémula* [3], наиболее широко распространенных в средней полосе России.

Т а б л и ц а 1

Химический состав листьев березы и осины

Составные части листьев	<i>Betula pendula</i> листья, % от сухой навески	<i>Pópulus trémula</i> листья, % от сухой навески
Целлюлоза	25.2	25
Лигнин	34.2	29.5
Пентозаны	17.9	11.2
Полиуроновые кислоты	12.2	11.55
Вещества, растворимые в горячей воде	32.5	29
Вещества, растворимые в серном эфире	8.42	7.96
Вещества, растворимые в спиртобензольной смеси	14.7	17.5
Метоксильные группы (-OCH ₃)	2.3	2.55
Зольность	4.22	5.65
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	17.6	14.9
Метоксильные группы в лигнине	2.77	4.02

Т а б л и ц а 2

Сорбционные свойства листьев различных видов деревьев по отношению к металлам

ИТМ	Вид дерева	Ссылка
1	2	3
Cd ²⁺	<i>Azadirachta indica</i> (Ним)	[4], [20], [21]
	<i>Psidium guajava</i> (Гуайява)	[5], [6], [7]
	<i>Syzygium cumini</i> (Джамболан)	[8], [9]
	<i>Ulmus</i> (Вяз)	[10]
	<i>Myrtus</i> (Мирт)	[11]
	<i>Eriobotrya japonica</i> (Мушмула японская)	[12]
	<i>Mangifera indica</i> (Манго индийское)	[13]
	<i>Carpinus betulus</i> (Граб обыкновенный)	[14]
	<i>Prunus avium</i> (Черешня)	[15]
	<i>Erythrina sandwicensis</i> (Эритрина гавайская)	[16]
	<i>Terminalia catappa</i> (Индийский миндаль)	[17]
	<i>Moringa oleifera</i> (Моринга масличная)	[18], [19]
	<i>Olea europaea</i> (Оливковое дерево)	[22]
	<i>Viscum</i> (Омела)	[23]
	<i>Tectona grandis</i> (Тиковое дерево)	[24]
	<i>Ficus religiosa</i> (Фигус священный)	[25]
<i>Nyssa</i> (Нипа)	[26]	
Cu ²⁺	<i>Cinnamomum camphora</i> (Камфорное дерево)	[27]
	<i>Acacia nilotica</i> (Акация аравийская)	[28]
	<i>Azadirachta indica</i> (Ним)	[29], [30]
	<i>Nyssa thebaica</i> (Дум пальма)	[31]
	<i>Mangifera indica</i> (Манго индийское)	[19]
	<i>Moringa oleifera</i> (Моринга масличная)	[32]
	<i>Eriobotrya japonica</i> (Мушмула японская)	[33]
	<i>Olea europaea</i> (Оливковое дерево)	[22]
	<i>Tectona grandis</i> (Тиковое дерево)	[34], [35]
	<i>Erythrina variegata</i> (Эритрина варигата)	[36]

1	2	3
Pb ²⁺	<i>Aegle marmelos</i> (Баиль)	[37]
	<i>Syzygium cumini</i> (Джамболан)	[38]
	<i>Cinnamomum camphora</i> (Камфорное дерево)	[39]
	<i>Catalpa speciosa</i> (Катальпа)	[40]
	<i>Ficus religiosa</i> (Фигус священный)	[41]
	<i>Eriobotrya japonica</i> (Мушмула японская)	[33]
	<i>Azadirachta indica</i> (Ним)	[21], [42], [43]
	<i>Olea europaea</i> (Оливковое дерево)	[22]
	<i>Viscum album</i> (Омела белая)	[44]
	<i>Viscum</i> (Омела)	[23]
	<i>Robinia</i> (Робиния)	[45], [46]
	<i>Firmiana simplex</i> (Фирмиана простая)	[47]
	<i>Hevea brasiliensis</i> (Гевея бразильская)	[48]
	<i>Anacardium occidentale</i> (Кешью)	[49]
<i>Carica papaya</i> (Дынное дерево)	[49]	
Zn ²⁺	<i>Madhuca longifolia</i> (Мадуга длиннолистная)	[50]
	<i>Polyalthia longifolia</i> (Полиалтия длиннолистная)	[50]
	<i>Sesamum indicum</i> (Кунжут индийский)	[51]
	<i>Mangifera indica</i> (Манго индийское)	[13]
Cr ⁶⁺	<i>Syzygium cumini</i> (Джамболан)	[52]
	<i>Tectona grandis</i> (Тиковое дерево)	[53]
	<i>Azadirachta indica</i> (Ним)	[54], [55]
	<i>Erythrina variegata</i> (Эритрина варигата)	[36]
Co ²⁺	<i>Azadirachta indica</i> (Ним)	[56], [60], [61], [63]
	<i>Acacia nilotica</i> (Акация аравийская)	[57]
	Нура (Нипа)	[26]
	<i>Ricinus communis</i> (Клещевина обыкновенная)	[58]
	<i>Mangifera indica</i> (Манго индийское)	[59], [61]
	<i>Eucalyptus</i> (Эвкалипт)	[61]
	Mangrove leaf (Листья мангровых деревьев)	[62]
	<i>Euclea schimperi</i> (Эуклея Шимпера)	[64]
Ni ²⁺	<i>Erythrina variegata</i> (Эритрина варигата)	[65]
	<i>Acacia nilotica</i> (Акация аравийская)	[66]
As ³⁺	<i>Tectona grandis</i> (Тиковое дерево)	[67]
	<i>Mangifera indica</i> (Манго индийское)	[13]
	<i>Moringa oleifera</i> (Моринга масличная)	[19]
Hg ²⁺	<i>Tectona grandis</i> (Тиковое дерево)	[67]
	<i>Fraxinus</i> (Ясень)	[68]
Ce ³⁺	<i>Moringa oleifera</i> (Моринга масличная)	[69]
	<i>Fraxinus</i> (Ясень)	[70]
La ³⁺	<i>Ricinus communis</i> (Клещевина обыкновенная)	[71]
	<i>Platanus orientalis</i> (Платан восточный)	[72]
Ag ²⁺	<i>Platanus orientalis</i> (Платан восточный)	[72]
	<i>Agave americana</i> (Агава американская)	[73]
Tl ³⁺	<i>Silivastrum orbicularis</i> (Багрянник европейский)	[74]
	<i>Ulmus minor</i> (Вяз малый)	[75]
Au ³⁺	<i>Eucalyptus</i> (Эвкалипт)	[76]
	<i>Celtis australis</i> (Каркас южный)	[77]
	<i>Paulownia</i> (Павловния)	
	<i>Castanea sativa</i> (Каштан посевной)	

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, листья данных деревьев имеют различное содержание составляющих, особенно

различается содержание лигнина и пентозанов при одинаковом количестве целлюлозы. Наличие в составе листьев лигнина и целлю-

лозы придает названному материалу высокие сорбционные показатели.

К настоящему времени изучены сорбционные характеристики листы различных пород деревьев по отношению к ионам металлов. Перечень литературных источников в зависимости от катиона металла и пород деревьев приведен в табл. 2.

Как следует из приведенных данных, большинство публикаций посвящено извлечению ионов тяжелых металлов из водных сред листьями деревьев различных пород.

Удаление ионов Cd(II). Наибольшее количество публикаций посвящено удалению ионов Cd^{2+} . В частности, проведенными исследованиями установлено, что степень удаления ионов Cd(II) листвой дерева *Azadirachta indica* составляет от 86 до 95%, меньшая степень извлечения названных ионов наблюдается при использовании листьев *Psidium guajava*: 60–63% [4–6]. Наибольшая степень удаления ионов Cd(II) (98%) наблюдается в случае использования листы дерева *Syzygium cumini* [8]. Проведенными экспериментами показано, что в зависимости от породы дерева и условий проведения эксперимента максимальная сорбционная емкость листьев по ионам Cd^{2+} составляет 15–48 мг/г [5, 8, 9, 10, 13] и зависит от значения pH вод-

ной среды. В табл. 3 приведены значения максимальной сорбционной способности (Q_{max}) некоторых биосорбентов по отношению к ионам Cd(II).

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что в большинстве случаев сорбционная емкость листьев деревьев по ионам Cd(II) выше, чем у некоторых отходов переработки сельскохозяйственного сырья, и по показателям уступает лишь шелухе арахиса.

Определены термодинамические параметры взаимодействия листы деревьев различных видов с ионами Cd(II) (табл. 4 [4, 12, 25]).

Данные, приведенные в табл. 4, неоднозначны, т.к. показатели энтропии и энтальпии определены при различных узких температурных интервалах. Также различаются и условия проведения экспериментов, в т.ч. и начальные концентрации ионов в воде.

Для увеличения сорбционной емкости листового опада используют модификацию различными реагентами. В частности, установлено, что обработка листьев дерева *Myrtus* раствором $KMnO_4$ привела к увеличению степени очистки с 78 до 98% при нейтральном значении pH и времени контакта 90 мин [11]. В основном процесс сорбции проводится в слабокислой среде при pH 4.5–6.0.

Т а б л и ц а 3

Максимальная сорбционная способность различных биосорбентов по отношению к ионам Cd(II)

Биосорбент	$Q_{max}, мг/г$
Листья <i>Ulmus</i>	6.94
Листья гуавы	31.15
Листья <i>Azadirachta indica</i>	21.45
Листья <i>Syzygium cumini</i>	34.54
Рисовая шелуха	8.58
Стебли пшеницы	11.6

Т а б л и ц а 4

Термодинамические параметры сорбции ионов Cd(II) листьями деревьев при температуре 293–313°K

Вид дерева	$\Delta H^0, кJ/mol$	$\Delta S^0, кJ/mol \cdot K$
<i>Syzygium cumini</i> (Джамболан)	3.7	16.87
<i>Azadirachta indica</i> (Ним)	73.7	0.24
<i>Eriobotrya japonica</i> (Мушмула японская)	29.7	125.44
<i>Ficus religiosa</i> (Фигус священный)	8.31	38.22

Показатели сорбции ионов меди (II) листвой деревьев разных видов

Вид дерева	Q_{\max} , мг/г	Степень очистки, %	ΔH^0 , кJ/mol	ΔS^0 , кJ/mol·K	Ссылка
<i>Azadirachta indica</i>	21.0–46.0	34–58	15.43	0.116	[29, 30]
<i>Azadirachta indica</i> , обработанная NaOH	50.6–78.0	77–59	–	–	[29, 30]
<i>Tectona grandis</i>	95.4–116.78	72	62.42	0.219	[34, 35]
<i>Acacia nilotica</i>	82.63	78	12.345	39.46	[28]
<i>Mangifera indica</i>	100	90	–	–	[19]

Удаление ионов Cu(II). Извлечение ионов Cu(II), по данным литературных источников, происходит достаточно эффективно и составляет 34–90%. Значения pH, при которых определялась сорбционная способность, находится в пределах pH 4–7. Приведены результаты обработки листьев *Azadirachta indica* раствором NaOH: при обработке степень очистки увеличивается с 58 до 77.4% и зависит от времени контакта сорбционного материала со средой [29, 30]. Наибольшую степень очистки показывает листва *Eriobotrya japonica*, обработанная NaOH, – 98% (необработанная листва дает только 68%-ю степень очистки). Максимальная сорбционная способность листьев определенных видов деревьев по ионам Cu(II) и термодинамические параметры сорбции приведены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, для некоторых листьев показатели степени очистки представлены интервалами значений. Данное обстоятельство объясняется различными начальными концентрациями ионов Cu^{2+} в воде и температурой проведения процесса. Кроме того, влияние на степень очистки и максимальную сорбционную емкость оказывает время контакта сорбционного материала с ионами Cu(II): с увеличением времени оба показателя увеличиваются [28–30, 33–35]. В некоторых случаях при времени контакта, превышающем 150 мин, происходит уменьшение сорбционной способности материала, что связано с десорбцией [29].

Удаление ионов Pb(II). В литературных источниках представлено множество данных

по удалению ионов свинца листвой деревьев. Показано, что оптимальные значения pH, при которых наблюдается максимальное извлечение ионов Pb(II), равно 4–7, температура проведения процесса 20–30°C, время контакта сорбционного материала с сорбатом составляет 60–120 мин. Оптимальные условия сорбции для разных видов листвы разные. Так, при извлечении ионов Pb(II) листьями *Cinnamomum camphora* при температуре 30°C максимальная сорбционная емкость составляет 73 мг/г [39], а листья *Viscum* при тех же условиях максимально сорбируют 769 мг/г [23]. Также значительно высокую сорбционную способность к ионам Pb(II) показывают листья *Azadirachta indica* – 300 мг/г при температуре 27°C [43]. Наименьшей сорбционной емкостью обладает листва *Catalpa speciosa* – 14,7 мг/г [40]. Тем не менее листва различных видов деревьев показывает относительно высокие показатели степени очистки: *Azadirachta indica* – 93% [42], *Hevea brasiliensis* – 95.3% [48], *Anacardium occidentale* – 92% [49]. Показатели максимальной сорбционной емкости листьев различных пород по отношению к ионам Pb(II) приведены в табл. 6.

Для повышения сорбции ионов свинца проводилась обработка листьев различными реагентами, в качестве реагента для модификации листьев *Hevea brasiliensis* используется водный раствор лимонной кислоты [48].

Удаление ионов Zn (II). Извлечение ионов Zn (II) из загрязненных вод с помощью листьев деревьев изучено мало, в отличие от

Значения максимальной сорбционной способности листьев различных видов деревьев по ионам Pb(II)

Вид дерева	Q _{max} , мг/г	Ссылка
<i>Syzygium cumini</i>	32.47	[38]
<i>Cinnamomum camphora</i>	73	[39]
<i>Catalpa speciosa</i>	14.7	[40]
<i>Azadirachta indica</i>	91.34	[21], [42], [43]
<i>Viscum</i>	769	[23]
<i>Firmiana simplex</i>	136.7	[47]
<i>Anacardium occidentale</i>	91.52	[49]
<i>Mangifera indica</i>	45	[13]

ионов других тяжелых металлов. Так, например, показано, что максимальная сорбционная способность листьев *Tectona grandis* – 16.42 мг/г, а *Azadirachta indica* – 147.08 мг/г [53, 54]. Адсорбционная способность листьев *Erythrina variegata* с увеличением pH с 1 до 6 изменяется с 38.25 до 44.77 мг/г. Показано, что с увеличением температуры сорбционная способность листьев *Erythrina variegata* уменьшается, а сорбционные кривые описываются уравнениями Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина [36].

Удаление ионов Cr (VI). Удаление ионов Cr(VI) отличается от удаления предыдущих ионов (Cd(II), Cu(II), Pb(II)) прежде всего тем, что в большинстве приведенных данных процесс проводят в кислой среде при pH 2–3. В этом случае протекают одновременно два процесса: восстановление ионов Cr(VI) до ионов Cr(III) и сорбция ионов Cr(III). Встречаются данные экспериментов с проведением процесса при pH среды ближе к нейтральной: сорбция ионов хрома листьями *Azadirachta indica* происходит при pH 4.5–7.5, и степень очистки достигает 99.7% [60]. При этом максимальная поглощательная способность составляет 125.83 мг/г [56]. Листья *Ricinus communis* также сорбируют ионы Cr(VI) при pH 7, но степень очистки при этом достигает 59%. Высокую степень очистки показывают листья *Mangifera indica*, *Eucalyptus*, *Euclea schimperi* – 98–99%, при pH 2 и временем сорбции, не превышающем 120 мин [61, 64]. Для удаления ионов хрома

(VI), как и для других ионов тяжелых металлов, используется обработка листы различными реагентами. Показано, в частности, что листья *Azadirachta indica* после обработки раствором HCl, а листья *Acacia nilotica* после модификации раствором H₃PO₄ увеличивают в несколько раз максимальную сорбционную способность по ионам хрома (pH 2, температура – 30°C [57, 63]).

Сорбция ионов драгоценных, редких и прочих металлов. В литературных данных представлена некоторая информация по извлечению из водных объектов ионов драгоценных металлов. Так, например, в работе [77] приведены данные по восстановлению ионов Au в водных растворах 16 видами листы различных деревьев. Определено, что степень удаления ионов золота составляет 80.1–98.4% в интервале значений pH 1–4. При этом поглощенные ионы Au(III) в порах сорбента образуют соединения, которые предлагается извлекать термической обработкой при $t = 1200^\circ\text{C}$. Изучение сорбции ионов Ag(III) листовым опадом мало изучено, тем не менее в литературных источниках имеются сведения, что оптимальное значение pH, при котором листья *Agave americana* и *Silivastrum orbicularis* эффективно поглощают ионы Ag(II), составляет pH 4.5–6 [74].

Удаление ионов As(III) с эффективностью 73% можно производить листьями *Moringa oleifera* или *Fraxinus*, при этом листва последнего имеет максимальную сорбционную емкость 99.97 мг/г [68, 69]. Термодинамиче-

ские показатели сорбции мышьяка листьями *Moringa oleifera* составляют $\Delta H^0 = 608.42 \text{ kJ/mol}$, $\Delta S^0 = 20.35 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$ [69].

Исследовано извлечение ионов церия и лантана листьями *Platanus orientalis*. Определено, что при $t = 50^\circ\text{C}$ и pH 6.8 степень очистки от ионов Ce(III) и La(III) составляет 98.36 и 86.03% соответственно [72]. Изучена сорбция ионов таллия (III) листьями *Ulmus minor* и *Eucalyptus* в нейтральной среде. Найдено, что максимальная сорбционная емкость по ионам Tl(III) листьев *Ulmus minor* составляет 54.6 мг/г, листьев *Eucalyptus* – 80.65 мг/г [75, 76]. Степень очистки от ионов таллия в обоих случаях превышает 80%.

Выводы. Кратко обобщены литературные сведения по использованию листьев деревьев в качестве сорбционных материалов для извлечения ионов металлов из водных сред. Показано, что сорбционная характеристика листьев различных деревьев по отношению к ионам металлов так же, как и у других сорбентов, зависит от условий среды. В основном эффективная сорбция проходит в слабокислой и нейтральной среде, и редко – в кислой. Влияние температуры неоднозначно, в отличие от значения pH среды. Показано, что увеличение сорбционной емкости листьев деревьев возможно при обработке последних различными реагентами. Проведенными исследованиями определено, что изотермы сорбции ионов металлов описываются в основном уравнениями Фрейндлиха и Ленгмюра, реже – Дубинина – Радужкевича и Темкина.

Литература

1. Shukla A., Zhang Y., Dubey P., Margrave J. The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water // J. of Hazardous Materials. 2002. № 95(2). P. 137–152.
2. Биоуроки, жизнь растений. URL: <http://biouroki.ru/material/plants/list.html> (дата обращения 28.05.2015).
3. Барсуков В.С. Физиолого-генетические аспекты устойчивости растений к тяжелым металлам: аналитический обзор / науч. ред. И.М. Гаджиев; Рос. акад. наук, Сибирское отделение РАН. Новосибирск, 1997. С. 63–68.
4. Sharma A., Bhattacharyya K. *Azadirachta indica* (Neem) leaf powder as a biosorbent for removal of Cd(II) from aqueous medium // J. Hazard Mater. 2005. № 125(1–3). P. 102–112.
5. Abdelwahab O., Fouad Y., Amin N., Mandor H. Kinetic and thermodynamic aspects of cadmium adsorption onto raw and activated guava (*Psidium guajava*) leaves // Environ. Prog. Sustainable Energy. 2015. № 34(2). P. 351–358.
6. Rao K., Anand S., Venkateswarlu P. *Psidium guajava* leaf powder – a potential low-cost biosorbent for the removal of cadmium(II) ions from wastewater // Adsorption Science & Technology. 2010. № 27. P. 163–178.
7. Rao K., Anand S., Venkateswarlu P. Response surface optimization for removal of cadmium from aqueous solution by waste agricultural *Psidium guajava* L. leaf powder // Clean Soil Air Water. 2012. № 40. P. 80–86.
8. Rao K., Anand S., Venkateswarlu P. Cadmium removal from aqueous solutions using biosorbent *Syzygium cumini* leaf powder: kinetic and equilibrium studies // Korean J. of Chemical Engineering. 2010. № 27(5). P. 1547–1554.
9. Rao K., Anand S., Venkateswarlu P. Modeling the kinetics of Cd(II) adsorption on *Syzygium cumini* L leaf powder in a fixed bed mini column // J. of Industrial and Engineering Chemistry. 2011. V. 17(2). P. 174–181.
10. Mahvi A., Gholami F., Nazmara S. Cadmium biosorption from wastewater by *ulmus* leaves and their ash // Eur. J. Scient. Res. 2008. № 23. P. 197–203.
11. Jameel M., Kadhem A., Hiend A. Removal of Cadmium (II) Ion from wastewater using natural and modified *myrtus communis* leaves // J. of Babylon University. Pure and Applied Sciences. 2014. V. 22(3). P. 1119–1131.
12. Awwada M., Salemb M. Kinetics and thermodynamics of Cd(II) biosorption onto loquat (*Eriobotrya japonica*) leaves // J. of Saudi Chemical Society. 2014. V. 18. P. 486–493.
13. Bhattacharyya K., Barua P., Sarma A. Biosorption of Cd(II), Pb(II), and Ni(II) on *Magnifera indica* leaf powder: an equilibrium study // World Environmental and Water Resources Congress. 2011. P. 1782–1795.
14. Zolgharnein J., Asanjarani N., Shariatmanesh T. Taguchi L orthogonal array optimization for Cd (II) removal using carpinus betulus tree leaves: Adsorption characterization // International Biodeterioration & Biodegradation. 2013. № 85. P. 66–77.
15. Salem N., Farhan A., Awwad A. Biosorption of Cadmium (II) from aqueous solutions by *Prunus Avium* leaves // American J. of Environmental Engineering. 2012. V. 2(5). P. 123–127.
16. Kumar A., Lingadurai S., Jain A., Barman N.R. *Erythrina variegata* linn: a review on morphology,

phytochemistry, and pharmacological aspects // Pharmacogn Rev. 2010. № 4(8). P. 147–152.

17. Rao K., Anand S., Venkateswarlu P. Equilibrium and kinetic studies for Cd(II) adsorption from aqueous solution on *Terminalia catappa* Linn leaf powder biosorbent // Indian J. of Chemical Engineering. 2010. V. 13. P. 329–336.

18. Harikishore Kumar Reddya D., Harinatha Y., Seshaiaha K. Biosorption of Pb(II) from aqueous solutions using chemically modified *Moringa oleifera* tree leaves // Chemical Engineering J. 2010. V. 162(2). P. 626–634.

19. Harikishore Kumar Reddya D., Harinatha Y., Seshaiaha K., Leec S.M. Optimization of Cd(II), Cu(II) and Ni(II) biosorption by chemically modified *Moringa oleifera* leaves powder // Carbohydrate Polymers. 2012. № 88(3). P. 1077–1086.

20. Sharma A., Bhattacharyya K. *Azadirachta indica* (Neem) leaf powder as a biosorbent for removal of Cd(II) from aqueous medium // J. of Hazardous Materials. 2005. № 125. P. 102–112.

21. Pandhare G., Trivedi N., Pathrabe R., Dawande S. Adsorption of cadmium (II) and lead (II) from a stock solution using Neem leaves powder as a low-cost adsorbent // International J. of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2013. V. 2(10). P. 5752–5761.

22. Awwad A., Farhan A., Equilibrium, kinetic and thermodynamics of biosorption of lead (II) copper (II) and cadmium (II) Ions from aqueous solutions onto olive leaves powder // American J. of Chemistry. 2012. V. 2(4). P. 238–244.

23. Nguyen V.S., Luong N.S. Desalination and Water Treatment. 2014. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2014.986532#.VNdoluasUxG> (дата обращения 28.05.2015)/

24. Rao K., Anand S., Venkateswarlu P. Adsorption of cadmium(II) ions from aqueous solution by *tectona grandis* L.f. (teak leaves powder) // BioResources, North America. 2010. URL:http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_05_1_0438_Rao_AV_Ads_Cd_Tectona_Teak (дата обращения 28.05.2015).

25. Rao K., Anand S., Venkateswarlu P. Adsorption of cadmium from aqueous solution by ficus religiosa leaf powder and characterization of loaded biosorbent // CLEAN – Soil, Air, Water. 2011. V. 39(4). P. 384–391.

26. Babatunde O. Ogunsil Abayomi A. Anomo, Adsorption of chromium (VI) and cadmium (II) from aqueous solution by soda lignin obtained from nypa palm leaves (*nypa Fruitcans*) // European J. of Applied Sciences. 2014. V. 7(2). P. 43–56.

27. Chen H., Dai G., Zhao J., Zhong A., Wu J., Yan H. Removal of copper(II) ions by abiosorbent – *Cinnamomum camphoraleaves* powder // J. of Hazardous Materials. 2010. № 177(1–3). P. 228–236.

28. Thilagavathy P., Santhi T. Removal of Cu(II) in batch mode using *Acacia nilotica* as adsorbent from aqueous and industrial // Waste water International J. of Research in Chemistry and Environment. 2014. V. 4(4). P. 52–62.

29. Sulaiman M., Garba M. Biosorption of Cu(II) ions from aqueous solution using, *Azadirachta indica* (Neem) Leaf Powder // Chemical and Process Engineering Research. 2014. № 27. P. 1–11.

30. Febriana N., Sisca O., Lesmana E., Soetare-djo F., *Neem* leaf utilization for copper ions removal from aqueous solution // J. of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2010. № 41. P. 111–114.

31. Jonathan Y., Hussaina H., Tijani J.O. Application of adsorbent from dum palm for the removal of manganese (II), zinc (II) and copper (II) ions from aqueous solution // J. of American Science. 2011. V. 7(10). P. 226–230.

32. Bhattacharyya K., Sarma A., Barua P. Sorption dynamics and process development for removal of copper from aqueous solution using a biosorbent based on mango tree leaves // World Environmental and Water Resources Congress. 2011. P. 4453–4468.

33. Awwad A., Salem N. Biosorption of copper(II) and lead(II) ions from aqueous solutions by modified loquat (*Eriobotrya japonica*) leaves (MLL) // J. of Chemical Engineering and Materials Science. 2012. V. 3(1). P. 7–17.

34. Rathnakumar S., Sheeja R.Y., Murugesan T. Removal of copper (II) from aqueous solutions using teak (*Tectona grandis* L.f) Leaves // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. V. 3. P. 764–768.

35. Prasanna Kumar Y., King P., Prasad V.S.R.K. Equilibrium and kinetic studies for the biosorption system of copper(II) ion from aqueous solution using *Tectona grandis* L.f. leaves powder // J. of Hazardous Materials. 2006. № 137. P. 1211–1217.

36. Tukaram Bai M., Komali K., Venkateswarlu P. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on biosorption of copper and zinc from mixed solution by *Erythrina variegata* orientalis leaf powder // Indian J. of chemical technology. 2010. V. 17(5). P. 346–355.

37. Chakravarty S., Mohanty A., Sudha T. Removal of Pb(II) ions from aqueous solution by adsorption using bael leaves (*Aegle marmelos*) // J. of Hazardous Materials. 2010. № 173. P. 502–509.

38. King P., Rakesh N., Beenalahari S., Kumar Y., Prasad V.S.R.K. Removal of lead from aqueous solution using *Syzygium cumini* L.: Equilibrium and kinetic studies // J. of Hazardous Materials. 2007. № 142. P. 340–347.

39. Chen H., Zhao J., Dai G., Wu J., Yan H. Adsorption characteristics of Pb(II) from aqueous solution onto a natural biosorbent, fallen *Cinnamomum*

- camphora* leaves // J. Desalination. 2010. № 262(1–3). P. 174–182.
40. Zolgharnein J., Shariatmanesh T., Asanjarani N., Zolanvari A. Doehlert design as optimization approach for the removal of Pb(II) from aqueous solution by *Catalpa Speciosa* tree leaves: adsorption characterization // Desalination and Water Treatment. 2015. V. 53(2). P. 430–445.
41. Qaiser S., Saleemi A., Umar M. Biosorption of lead from aqueous solution by ficus religiosa leaves: batch and column study // J. of Hazardous Materials. 2009. № 166(2–3). P. 998–1005.
42. Zafar M.N., Parveen A., Nadeem R. A pretreated green biosorbent based on Neem leaves biomass for the removal of lead from wastewater // Desalination and Water Treatment. 2013. № 51(22–24). P. 4459–4466.
43. Bhattacharyya K., Sharma A., Adsorption of Pb(II) from aqueous solution by *Azadirachta indica*(Neem) leaf powder // J. of Hazardous Materials. 2004. № 113. P. 97–109.
44. Erenturka S., Malkoc E. Removal of lead(II) by adsorption onto *Viscum album* L.: Effect of temperature and equilibrium isotherm analyses // Applied Surface Science. 2007. 253(10). P. 4727–4733.
45. Zolgharnein J., Shahmoradi A., R. Sangi M. Optimization of Pb(II) biosorption by *Robinia* tree leaves using statistical design of experiments // Talanta. 2008. № 76(3). P. 528–532.
46. Zolgharnein J., Shahmoradi A., Ghasemi J. Comparative study of Box–Behnken, central composite, and doehlert matrix for multivariate optimization of Pb (II) adsorption onto *Robinia* tree leaves // J. of Chemometrics. 2013. V. 27(1–2). P. 12–20.
47. Li Z., Tang X., Chen Y., Wei L., Wang Y. Activation of *Firmiana Simplex* leaf and the enhanced Pb(II) adsorption performance: equilibrium and kinetic studies // J. of Hazardous Materials. 2009. № 169(1–3). P. 386–394.
48. Kamal M.H.M.A., Azira W.M.K.W.K. Sequestration of toxic Pb(II) ions by chemically treated rubber (*Hevea brasiliensis*) leaf powder // J. of Environmental Sciences. 2010. V. 22(2). P. 248–256.
49. Raju R., Kiran G.A.R., Rao N. Comparison studies on biosorption of lead (II) from an aqueous solution using *anacardium occidentale* and carica papaya leaves powder // International J. of Emerging Trends in Engineering and Development. 2013. V. 1(3). P. 273–283.
50. Rehman R., Anwar J., Mahmud T. Sorptive removal of lead (II) from water using chemically modified mulch of *Madhuca longifolia* and *Polyalthia longifolia* as novel biosorbents // Desalination and Water Treatment. 2013. № 51(13–15). P. 2624–2634.
51. Iu L., Liu J., Li H., Zhang H., Liu J., Zhang H. Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies of lead (II) biosorption on sesame leaf, *BioResources*. 2012. URL: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_3_3555_Liu_LLZLZ_Equilibrium_Kinetic_Thermody_Lead_Sesame (дата обращения 28.05.2015).
52. Kinga P., Rakesha N., Beena Laharia S. Biosorption of zinc onto *Syzygium cumini* L.: equilibrium and kinetic studies // Chemical Engineering J. 2008. № 144(2). P. 181–187.
53. Kumar, Y.P., King, P., V.S.R.K. Prasad, Zinc biosorption on *Tectona grandis* L.f. leaves biomass: equilibrium and kinetic studies // Chemical Engineering J. 2006. № 124(1–3). P. 63–70.
54. Bhattacharyya K., Sarma J., Sarma A. *Azadirachta indica* leaf powder as a biosorbent for Zn(II) in aqueous medium // J. of Hazardous Materials. 2009. № 165(1–3). P. 271–278.
55. Arshada M., Zafara M.N., Younisa S., Nadeema R. The use of Neem biomass for the biosorption of zinc from aqueous solutions // J. of Hazardous Materials. 2008. № 157(2–3). P. 534–540.
56. Kovo A., Olu S., Gwatana E. Adsorption of chromium (IV) by a low cost adsorbent prepared from Neem leaves // Iranica J. of Energy & Environment. 2014. V. 5(3). P. 277–286.
57. Thilagavathy P., Santhi T. Adsorption of Cr (VI) onto low-cost adsorbent developed from *Acacia Nilotica* leaf activated with phosphoric acid: kinetic, equilibrium isotherm and thermodynamic studies // International J. of Science and Research. 2014. V. 3(5). P. 308–314.
58. Makeswari M., Santhi T. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions by using activated carbons prepared from *Ricinus communis* leaves: binary and ternary systems // Arabian J. of Chemistry. 2014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535213003456> (дата обращения 28.05.2015).
59. Saha R., Saha B. Removal of hexavalent chromium from contaminated water by adsorption using mango leaves (*Mangifera indica*) // Desalination and Water Treatment. 2014. V. 52(10–12). P. 10–12.
60. Majithiya D., Yadav A., Tawde S. Comparative study of *Azadirachta indica* (Neem) leaf powder and activated charcoal as an adsorbent for removal of chromium from an aqueous solution // J. of Environmental Science and Sustainability. 2013. V. 1(1). P. 21–27.
61. Kumar S., Narayanaswamy R., Stripathy M., Pai K. Comparative study of removal of chromium – IV ion from aqueous solution using *Eucalyptus*, *Neem* and *Mango* Leaves // International J. of Engineering Research and Development. 2013. V. 8(2). P. 56–61.
62. Sathish T., Vinithkumar N., Dharani G., Kirubakaran R. Efficacy of mangrove leaf powder for bioremediation of chromium (VI) from aqueous

solutions: kinetic and thermodynamic evaluation // Applied Water Science. 2014. V. 5. P. 153–160.

63. Venkateswarlu, P., Ratnam, M., Rao, D., Rao, M., Removal of chromium from an aqueous solution using *Azadirachta indica* (Neem) leaf powder as an adsorbent // International J. of Physical Sciences. 2007. V. 2(8). P. 188–195.

64. Gebrehawaria G., Hussen A., Rao M. Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using barks of *Acacia albida* and leaves of *Euclea schimperii* // International J. of Environmental Science and Technology. 2015. V. 12. P. 1569–1580.

65. Aditya G., Pujitha B., Babu N., Venkateswarlu P. Biosorption of chromium onto *Erythrina Variegata Orientalis* leaf powder // Korean J. of Chemical Engineering. 2012. V. 29. P. 64–71.

66. Thilagavathy P., Santhi T. Adsorption and Desorption Performance of *Acacia nilotica* for the Removal of cobalt(II) by column and batch mode study from aqueous phase and its suitability in real waste water // International J. of Science and Research. 2014. V. 3(5). P. 393–399.

67. Vilvanathan S., Shanthakumar S. Removal of Ni(II) and Co(II) ions from aqueous solution using teak (*Tectona grandis*) leaves powder: adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamics study // Desalination and Water Treatment. 2014. URL: [http://www.researchgate.net/publication/269997309_Removal_of_Ni\(II\)_and_Co\(II\)_ions_from_a_ aqueous_ solution_using_teak_\(Tectona_grandis\)_leaves_powder_adsorption_kinetics_equilibrium_and_thermodynamics_study](http://www.researchgate.net/publication/269997309_Removal_of_Ni(II)_and_Co(II)_ions_from_a_ aqueous_ solution_using_teak_(Tectona_grandis)_leaves_powder_adsorption_kinetics_equilibrium_and_thermodynamics_study) (дата обращения 28.05.2015).

68. Zolgharnein J., Shahmoradi A., Zolgharnein P., Amani S. Multivariate optimization and adsorption characterization of as (III) removal by using *Fraxinus Tree, Leaves* // Chemical Engineering Communications. 2014. URL: [http://www.researchgate.net/publication/231538294_Characterization_of_Sorption_Isotherms_Kinetic_Models_and_Multivariate_Approach_for_Optimization](http://www.researchgate.net/publication/231538294_Characterization_of_Sorption_Isotherms_Kinetic_Models_and_Multivariate_Approach_for_Optimization_of_Hg(II)_Adsorption_onto_Fraxinus_Tree_Leaves)

of_Hg(II)_ Adsorption_onto_Fraxinus_Tree_Leaves (дата обращения 29.05.2015).

69. Sumathi T., Alagumuthu G., Adsorption studies for arsenic removal using activated *Moringa oleifera* // International J. of Chemical Engineering. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/430417> (дата обращения 28.05.2015).

70. Zolgharnein J., Shahmoradi A. Characterization of sorption isotherms, kinetic models, and multivariate approach for optimization of Hg(II) adsorption onto *Fraxinus Tree Leaves* // J. of Chemical and engineering. 2010. 55 (11). P. 5040–5049.

71. Rmali S., Dahmani A., Abuein M., Gleza A. Biosorption of mercury from aqueous solutions by powdered leaves of castor tree (*Ricinus communis* L.) // J. of Hazardous Materials. 2008. № 152. P. 955–959.

72. Sert S., Kutahyalı C., Inan S., Talip Z. Biosorption of lanthanum and cerium from aqueous solutions by *Platanus orientalis* leaf powder // Hydrometallurgy. 2008. № 90. P. 13–18.

73. Marciano A., Chefetz B., Gedanken A. Differential adsorption of silver nanoparticles to the inner and outer surfaces of the *Agave americana* cuticle // J. Phys. Chem. C. 2008. № 112 (46). P. 18082–18086.

74. Zolgharnein J., Shariatmanesh T., Asanjarani N. *Cercis siliquastrum* Tree leaves as an efficient adsorbent for removal of Ag(I): response surface optimization and characterization of biosorption // Clean – Soil, Air, Water. 2013. № 41(12). P. 1183–1195.

75. Zolgharnein J., Asanjarani N. S. Optimization and characterization of Tl(I) adsorption onto modified *Ulmus carpinifolia* tree leaves // Clean – Soil, Air, Water. 2011. № 39(3). P. 250–258.

76. Khavidaki H.D., Aghaie H. Adsorption of thallium(I) ions using eucalyptus leaves powder // Clean – Soil, Air, Water. 2013. № 41. P. 673–679.

77. Aktas S., Gozuak B., Acma H. Gold recovery from chloride solutions using fallen leaves // Environmental Chemistry Letters. 2011. V. 9(1). P. 47–53.

REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM WATER USING FALLEN LEAVES AS A BIOSORBENT

© A.A. Alekseeva, I.G. Shaykhiev, S.V. Stepanova

Kazan Research Technological Institute,
68, ulitsa Karla Marksa, 420111, Kazan, Russian Federation

This review article summarizes literature data on the use of leaves of various tree species as sorbents for removing heavy metal ions from aqueous media. It is shown that sorption characteristics of this material and

the degree of the removal of metal ions depend on the conditions of adsorption and of tree species. The conditions of carrying out the process are understood to include the initial concentration of the metal ion, temperature, pH and contact time. It has been found that the maximum sorption capacity for the majority of trees is achieved at pH 4–7, in rare cases, however, at pH 2, specifically in removing Cr (VI). Some works contain thermodynamic parameters of the sorption process, which explain its mechanism. Thus, it is determined that the sorption isotherm of metal ions is described mainly by the Freundlich and Langmuir equations, and less frequently by the Dubinin-Radushkevich and Temkin equations. It is shown that the majority of publications deal with the removal of Cd (II), Cr (VI), Cu (II) and Pb (II) toxic ions from aqueous media. The literature search has revealed that fallen leaves can be used to remove rare metal ions from aqueous media and to extract precious metal ions prior to applying thermal extraction methods. The highest sorption indicators are observed in the leaves of mistletoe (*Viscum*) and teak (*Tectona grandis*); the greatest number of publications is dedicated to adsorption using the leaves of Neem tree (*Azadirachta indica*), Jambolan (*Syzygium cumini*) and Japanese medlar (*Eriobotrya japonica*). It has been proved that chemical modification of tree leaves with various reagents improves sorption properties and increases the degree of water purification.

Key words: heavy metal ions, leaves, purification, adsorption capacity.

УДК 541.183

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СОРБЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ЛИСТОВОГО ОПАДА ПО ОТНОШЕНИЮ К ИОНАМ ЖЕЛЕЗА (II)

© А.Ш. Шаймарданова, С.В. Степанова

Одной из острых проблем, связанных с развитием различных отраслей промышленности, является вовлечение в круговорот в окружающей среде тяжелых металлов, в том числе соединений меди, цинка, галлия, молибдена, кадмия, марганца, железа, никеля, хрома, вольфрама, свинца и т.д.

Главными источниками соединений железа в природных водах являются процессы химического выветривания и растворения горных пород. Железо реагирует с содержащимися в природных водах минеральными и органическими веществами, образуя сложный комплекс соединений, находящихся в воде в растворенном, коллоидном и взвешенном состоянии. Значительные количества железа поступают с подземным стоком и со сточными водами предприятий металлургической, металлообрабатывающей, текстильной, лакокрасочной промышленности и с сельскохозяйственными стоками.

В связи с этим исследовалась возможность использования различного вида листового опада (березовый опад, смешанный опад, дубовый опад) в качестве сорбционного материала по отношению к ионам железа (II). В модельных растворах в качестве загрязнителя использовался $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Первоначально адсорбцию проводили при постоянном перемешивании в течение 3 ч с концентрацией ионов железа (II) от 20 до 4000 мг/дм³, остаточные концентрации ионов железа определяли комплексометрическим методом. В результате получили, что максимальной сорбционной емкостью по отношению к ионам железа обладает дубовый опад – 91 мг/г.

В последующих экспериментах определяли максимальную сорбционную емкость листового опада, модифицированного 1%-м раствором серной кислоты, 3%-м раствором уксусной кислоты, при исходной концентрации ионов железа (II) в растворе 100 мг/дм³.

Установлено, что сорбционная емкость образцов, обработанных 1%-м раствором серной кислоты, 3%-м раствором уксусной кислоты, увеличивается в 4 раза по сравнению результатами исходного листового опада.

Таким образом, доказана эффективность модификации листового опада слабыми растворами кислот и дальнейшее его применение в качестве альтернативного вида растительного сорбента по отношению к ионам железа.

Ключевые слова: листовой опад, ионы железа, сорбционная емкость, химическая обработка, серная кислота, уксусная кислота.

В настоящее время остро стоят вопросы деградации окружающей среды, которая в значительной мере связана с отрицательным воздействием органических и неорганических веществ, при этом химическое загрязнение продолжает оставаться возрастающей угрозой. Хотя перечень и количество выбрасы-

ваемых в окружающую среду поллютантов достаточно велики, первоначальному контролю содержания в ее объектах должны подлежать токсичные загрязнения, а также загрязнения, обладающие высокой устойчивостью в объектах окружающей среды при низких значениях предельно допустимых концентраций.

ШАЙМАРДАНОВА Алсу Шамилевна, Казанский национальный исследовательский технологический университет, e-mail: alsou.90@bk.ru

СТЕПАНОВА Светлана Владимировна – к.т.н., Казанский национальный исследовательский технологический университет, e-mail: ssvkan@yandex.ru

Из числа опасных загрязнителей широко распространены тяжелые металлы, такие как медь, свинец, железо, никель, цинк, образующиеся на предприятиях черной и цветной металлургии, машиностроения. Будучи опасными веществами, при взаимодействии с другими веществами они могут образовывать чрезвычайно токсичные соединения. Тяжелые металлы, включаясь в пищевую цепь, способны концентрироваться в организмах до количеств, в сотни и тысячи раз превосходящих их содержание в окружающей среде. Кроме того, металлы обладают ярко выраженным эффектом суммации, из-за чего совместное присутствие нескольких элементов значительно усиливает их токсическое действие [1].

В связи с этим необходимо совершенствовать методы и средства очистки воды. Одним из способов приведения воды к надлежащему качеству является сорбционный метод, позволяющий наиболее эффективно извлекать из сред различные загрязнители [2]. При этом в качестве исходного материала для получения сорбентов могут использоваться сорбенты на основе природных материалов.

Нетрадиционным сырьем, которое еще не нашло широкого применения в промышленности, может стать листовая опад различных пород деревьев.

Преобладающим компонентом листы является целлюлоза (клетчатка) – 40÷80%. Содержание аморфного полимера лигнина составляет 20÷30%. Такое соотношение лигнин / целлюлоза является типичным для высших растений. Весьма существенно содержание в палой листве фенольных соединений (до 12%) [3]. Целлюлоза является сорбционно-активным полимером, поэтому используется для создания различного рода сорбентов, мембран и катализаторов.

В последние годы наметилась тенденция к использованию волокнистых комплексобразующих сорбентов для выделения микроэлементов из промышленных сточных вод. Целлюлозосодержащие волокнистые сорбенты высокоэффективны при сорбции ионов тяжелых металлов, концентрировании индикаторных количеств радионуклидов. Они обла-

дают более высокими кинетическими характеристиками по сравнению с гранулированными или пористыми сорбционными материалами. Кроме того, целлюлозосодержащие материалы проявляют селективность, легко регенерируются и сохраняют работоспособность в водно-органических средах.

На начальном этапе проведения экспериментов определяли максимальную сорбционную емкость (мг/г) различных видов листового опада (березового – БО, смешанного – СО, дубового – ДО) по отношению к ионам железа (II) в статических условиях. Состав смешанного опада представлен листво́й березы, дуба, клена и рябины в равных долях. В модельных растворах в качестве загрязнителя использовался $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Для нахождения сорбционной емкости (рис. 1) в плоскодонные колбы объемом 250 мл наливали по 200 мл растворов, содержащих ионы Fe(II) в концентрациях от 20 до 4000 мг/дм³, и помещали образцы исследуемых сорбционных материалов (СМ) массой 1 г. Эксперимент проводили в течение трех часов при постоянном перемешивании. Навески соли брались с учетом кристаллизационной воды. В фильтрах определяли остаточные концентрации ионов железа согласно стандартным методикам [4].

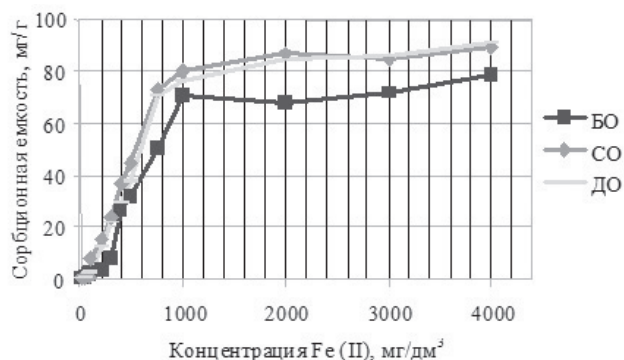


Рис. 1. Зависимость сорбционной емкости (мг/г) листового опада от концентрации ионов железа (II) в растворе

Результаты исследования показали, что наибольшая сорбционная емкость по отношению к ионам железа составляет для БО – 79 мг/г, СО – 89 мг/г, ДО – 91 мг/г.

Повысить сорбционную емкость листового опада по отношению к ионам железа (II) возможно по данным литературных источников [5] с помощью химической обработки. Задача повышения сорбционных свойств природных материалов путем применения различных способов модификации с использованием доступных реагентов и простых технологических операций является весьма актуальной и имеет практическую ценность.

На следующем этапе работы проводили исследования влияния параметров химической обработки сорбента на его сорбционные свойства по отношению к ионам железа (II). Определяли сорбционную емкость модификатов вышеуказанного сорбента в зависимости от времени, вида модифицирующего реагента и его концентрации в растворе.

Проводили обработку исследуемых образцов листового опада 0.5; 1 и 3%-м раствором серной (H_2SO_4) и уксусной (CH_3COOH) кислот.

Ход проведения модификации: в колбы объемом 250 мл наливали 200 мл раствора серной или уксусной кислот с концентрациями 0.5; 1; 3% и помещали 10 г сорбента. Химическую обработку проводили в течение 20 мин при 20°C. Затем образцы промывали до доведения pH водной среды до нейтральной и сушили до постоянной массы.

У полученных после кислотной обработки образцов сорбционного материала (СМ) определяли значение сорбционной емкости по отношению к ионам железа. Ход проведения эксперимента соответствует описанному ранее.

Значения сорбционной емкости (мг/г) по ионам железа для исследуемых образцов, показавших наилучший результат, представлены в табл. 1.

Установлено, что образцы, обработанные 1%-м раствором H_2SO_4 и 3%-м раствором CH_3COOH , имеют наибольшие значения сорбционной емкости.

Максимальная сорбционная емкость модифицированных образцов увеличивается по сравнению с исходным СМ: для БО на 16%, СО – 13%, ДО – 21%.

Полученные результаты подтверждают, что при обработке растительных материалов слабыми растворами кислот происходит разрушение молекул гемицеллюлозы, растворение и вымывание низкомолекулярных фрагментов и белков и, как следствие, образование новых поровых пространств [6].

При действии на целлюлозу некоторых химических реагентов (кислот, воды при высокой температуре, некоторых окислителей) гликозидная связь в молекуле целлюлозы становится менее устойчива, чем углерод-углеродная связь. Разрыв гликозидных связей при действии этих реагентов приводит к снижению степени полимеризации глюкозы, т.е. к протеканию процесса деструкции [6].

Несмотря на различные механизмы процесса деструкции, в итоге происходит изменение физико-химических, механических свойств целлюлозы в одном и том же направлении. В зависимости от условий проведения процесса, происходит более или менее значительное понижение полимеризации целлюлозы.

С целью дальнейшей возможности увеличения сорбционной емкости путем изменения физических параметров модификации, дальнейшее исследование проводили с образцами, обработанными 1%-м раствором H_2SO_4 и 3%-м раствором CH_3COOH при различных температурах (5, 20, 35, 50°C) и времени протекания процесса (10, 20, 30, 45, 60 мин), согласно описанной выше методике. У полученных после кислотной обработки образцов определяли значение максимальной сорбционной емкости при концентрации ионов железа (II) в модельных растворах равной 100 мг/дм³. Согласно результатам первого эк-

Т а б л и ц а 1

Сорбционная емкость (мг/г) исследуемых образцов по отношению к ионам железа

Вид модифицирующего реагента и его концентрация в растворе	Вид сорбционного материала, мг/г		
	БО	СО	ДО
1%-й раствор H_2SO_4	90	101	111
3%-й раствор CH_3COOH	91.8	97.9	96

Значения сорбционной емкости листового опада по ионам железа

Время контакта с растворами кислот, мин	Сорбционная емкость, мг/г								
	Исходный образец	Концентрация реагента, %							
		1%-й раствор H ₂ SO ₄				3%-й раствор CH ₃ COOH			
		5°C	20°C	35°C	50°C	5°C	20°C	35°C	50°C
БО									
10	3.0	7.6	8.9	7.7	6.2	6.4	7.9	8.4	7.9
20	2.8	8.3	8.7	7.4	5.4	5.3	8.2	8.7	7.7
30	4.5	6.5	9.3	6.2	5.2	5.0	7.4	9.2	7.9
45	4.4	4.7	8.9	5.2	4.1	4.1	7.1	8.4	8.4
60	2.7	5.1	7.2	6.2	5.0	6.2	6.3	6.1	6.2
СО									
10	9.0	9.2	10.3	8.4	7.3	7.4	9.1	10.7	9.0
20	10	8.3	11.7	8.9	7.1	7.2	8.4	10.4	8.5
30	9.4	7.4	9.8	9.2	6.9	6.8	7.2	11.8	7.2
45	8.5	6.3	8.4	8.0	5.4	6.2	6.4	9.3	6.0
60	4.2	6.0	6.8	7.1	5.7	6.0	6.4	6.4	5.9
ДО									
10	2.8	9.3	11.2	9.3	8.0	8.4	9.4	9.2	8.5
20	3.0	8.5	12.0	8.1	7.5	8.9	9.5	8.2	9.4
30	4.5	7.3	11.0	7.6	6.5	8.5	8.3	7.1	8.5
45	3.0	6.3	10.4	6.4	7.1	7.2	7.2	6.0	7.5
60	3.1	7.1	9.8	6.4	7.4	6.1	5.9	6.2	6.9

сперимента, при концентрации ионов железа (II) в растворе 100 мг/дм³ наблюдается наибольшая степень очистки (10%). Ход проведения эксперимента соответствует описанному ранее.

Значения сорбционной емкости по ионам Fe(II) в зависимости вида и концентрации кислотного раствора, температуры и времени контактирования представлены в табл. 2.

Анализируя данные, представленные в табл. 2, установлено, что наибольшая сорбционная емкость для БО – 9.3 мг/г (обработка 1%-м раствором H₂SO₄ при 20°C в течение 30 мин), для СО – 11.8 мг/г (обработка 3%-м раствором CH₃COOH при 35°C в течение 30 мин), для ДО – 12.0 мг/г (обработка 1%-м раствором H₂SO₄ при 20°C в течение 20 мин).

Таким образом, проведенными экспериментами определено, что обработка листового опада 1%-м раствором H₂SO₄ и 3%-м раствором CH₃COOH способствует увеличению предельной сорбционной емкости по ионам Fe(II) для БО в 2 раза, для СО – 1.25 раза, для ДО – в 4 раза по сравнению с результатами с использованием исходных образцов СМ.

Литература

1. Зайцев В.Ф., Григорьев В.А. Крючков В.Н. Особенности распределения тяжелых металлов в органах и тканях туводных видов ихтиофауны Волго-Ахтубинской поймы // Вестник АТИМРПИХ. 1993. № 4. С. 69–71.
2. Долбня И.В. Модификация абрикосовой косточки с целью получения сорбционного материала для очистки водных сред от нефтепродуктов // Тез. докл. Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». Югра, 24–27 августа 2014 г. Югра, 2014. С. 24–28.
3. Долгих Е.А., Кавеленова Л.М. Особенности химического состава опада дуба и липы в зависимости от комплекса лесорастительных условий // Химия растительного сырья. 1999. № 4. С. 25–31.
4. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 285 с.
5. Kokot S. An electron spin resonance study of tae copper interaction with wool-keratin. Part 1. An interpretation and the properties of a copper/wool ESR Spectrum / S. Kokot, M. Feughelman, R.M. Golding // Text. Res. J. 1972. V. 42, № 12. P. 704–708.
6. Роговин З.А. Химия целлюлозы / З.А. Роговин. М.: Химия, 1972. 520 с.



THE USE OF CHEMICAL REAGENTS TO INCREASE THE SORPTION CAPACITY OF LEAF LITTER IN RELATION TO IRON (II) IONS

© **A.S. Shaimardanova, S.V. Stepanova**

Kazan National Research Technological University,
68, ulitsa Karla Marksa, 420015, Kazan, Russian federation

One of the serious problems associated with the development of various industries is the involvement of heavy metals, including copper, zinc, gallium, molybdenum, cadmium, manganese, iron, nickel, chromium, tungsten, lead, etc., in the environmental cycles.

The main sources of iron compounds in natural waters are the processes of chemical weathering and dissolution of rocks. Iron reacts with the mineral and organic matter contained in natural waters and forms a whole complex of dissolved, colloidal and suspended compounds. Considerable amounts of iron come with underground water flow and wastewater of metallurgical, metalworking, textile, paint and agricultural enterprises.

In this regard, we investigated the possibility of using different types of leaf litter (birch, mixed and oak leaves) for sorption of iron (II) ions. In model solutions we used $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ as a contaminant.

The adsorption experiments were first carried out at constant stirring for 3 hours, with iron (II) ion concentrations between 20 mg/dm³ and 4,000 mg/dm³. Residual iron ion concentrations were determined using complexometric titration. The result was that oak litter has the maximum sorption capacity of iron ions (91 mg/g).

In order to increase the sorption capacity, the leaf litter was subjected to treating with weak acid solutions (aqueous solutions of 1% sulfuric acid and 3% acetic acid). In subsequent experiments we determined the maximum sorption capacity of the modified leaf litter with the initial iron (II) ion concentration at 100 mg/dm³.

Analyzing the experimentally obtained values of the maximum sorption capacity of leaf litter, we found that the sorption capacity of the samples treated with aqueous solutions of 1% sulfuric acid and 3% acetic acid showed a four-fold increase as compared with the results in case of the leaf litter remained untreated.

Thus, we proved the effectiveness of leaf litter modification with weak acid solutions and its further use as an alternative vegetative sorbent of iron ions.

Key words: leaf litter, iron ions, sorption capacity, chemical treatment, sulfuric acid, acetic acid.

УДК 576.15.42:57.015.5:577.122:633.11

СУПРАМОЛЕКУЛЯРНО-БИОХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ РЕОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕРФАЗНОГО ХРОМАТИНА ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ СТРЕССА

© Э.А. Иванова, Г.Х. Вафина, Р.С. Иванов

Показано, что в условиях многолетней адаптации к холодовому шоку в зародышах озимой пшеницы (при выходе их из состояния биологического покоя) на уровне супраструктур организации «ядерного матрикса» хроматина, в период завершающего этапа первой волны его активации, происходит увеличение тотальной экранируемости аргинин-Х к протеазо-процессингу. Возможно, это зоны, влияющие на архитектурную организацию клеточного ядра, способного перепрограммироваться, чтобы пережить сложные условия окружающей среды.

Ключевые слова: пшеница, протеомика, клеточное ядро, супрамолекулярная биохимия, *Arg*-Х протеолиз.

В настоящее время вопросы динамики перепрограммирования генетической информации хроматиновой матрицы переходят в разряд анализа устройства супрамолекулярной биохимической системы, отражающей пространственную организацию биохимических реакций, где каждый компонент вносит в эту систему нечто уникальное, присущее только ему. Рассмотрение пространственного аспекта биохимических реакций необходимо для понимания закономерностей морфогенеза с целью дальнейшей разработки эффективных информационно-компьютерных технологий, связанных с оценкой свойств хроматина клеток растений при различных физиологических состояниях (переохлаждение при заморозках, обезвоживание при засухе, созревание семян). В перечень приоритетных направлений на следующее десятилетие в исследовании сельскохозяйственных растений ЕРИС – Международным консорциумом эпигенетики растений – в 2011 г. включен пункт о необходимости понять молекулярные основы взаимодействия генотипа и среды, которые изменяют характеристики растений в различных условиях [1]. Считают, что «хроматиновая матрица – это физиологически важный субстрат, на ко-

тором разворачиваются ремоделинг и механизм транскрипции» [2]. За последнее время многочисленные исследования посвящены анализу изучения пространственной организации генома, поскольку очевидно, что она тесно связана с его функционированием [3]. О том, что пространственный аспект биохимических реакций находится полностью вне поля зрения биохимиков, в свое время указывал Рене Тома [4]. К самым значительным открытиям в настоящее время принадлежит выяснение расположения хромосом в интерфазных ядрах и то, что их структура контролируется как генетическими, так и экологическими факторами [5]. Вопросы самоорганизации биологических систем находятся в центре внимания специалистов по высокомолекулярным соединениям, а именно – биополимерам. Как известно, взаимодействующие в клетке молекулы иммобилизованы на полимерных структурах [6] внеклеточного матрикса, цитоскелета, ядерного матрикса или мембранах. То есть они входят в определенные надмолекулярные комплексы, где уже интегрированы взаимодействия многих макромолекул. Таким образом, вопросы биохимии переходят в разряд рассмотрения супрамоле-

ИВАНОВА Эвила Александровна – д.б.н., Уфимский институт биологии РАН, e-mail: evilina@anrb.ru
ВАФИНА Гюльнар Хамидовна – к.б.н., Уфимский институт биологии РАН, e-mail: evilina@anrb.ru
ИВАНОВ Руслан Сергеевич – к.б.н., Уфимский институт биологии РАН, e-mail: evilina@anrb.ru

кулярной химии, то есть «химии запрограммированных несущих информацию молекул» [7]. С этой позиции мы специально сфокусировали свое внимание на выявлении *Arg-X* протеазочувствительных сайтов, исходя из роли аргинина, участвующего в эволюционной стабильности аргининбогатых гистонов. Предполагают, что протеолитический процессинг является одним из способов необратимой посттрансляционной модификации, осуществляемой в процессе ремоделирования хроматина [8]. Наиболее чувствительны к протеолизу N-терминальные/C-терминальные хвосты гистонов, в то время как глобулярные домены относительно устойчивы к этой модификации, при условии, что гистоны находятся в составе хроматина [8].

Целью данной работы был анализ локализации *Arg-X* протеазочувствительных сайтов в супраструктурах хроматина, связанного с нуклеоплазмой, непрочно- и прочносвязанного с ядерным матриксом, и собственно ядерного матрикса как возможных зон, влияющих на конформационные перестройки тотального интерфазного хроматина при индукции вегетативной фазы ростового морфогенеза зрелых зародышей яровой и озимой пшениц.

Объектом исследования служили семена суперэлиты пшениц (*Triticum aestivum* L.) сортов: Артемовки (яровая), Мироновской 808 (озимая), Мироновской яровой, полученные из коллекции Всероссийского института растениеводства им. Н.И. Вавилова. Подроб-

ное описание метода выведения озимого сорта Мироновской 808 из ярового сорта Артемовки представлено в работе [9]. Сорт Мироновской яровой пшеницы был получен путем «расшатывания» наследственности озимой Мироновской 808 [10]. Состояние воздушно-сухого семени и зародыша (находящихся в состоянии биологического покоя) мы условно приняли за 0 ч. Замачивание семян осуществлялось в течение 3 ч. Из воздушно-сухих семян (0 ч), набухших (3 ч) и инициированных к росту зародышей 6 ч, 9 ч, 12 ч, 15 ч, 18 ч, 21 ч, отделенных от эндосперма (рис. 1, в), выделяли клеточные ядра [11] и их надмолекулярные супраструктуры (рис. 2, 3): нуклеоплазму (Нп), хроматин непрочно- (Хр-I) и прочно- (Хр-II) связанный с ядерным матриксом (ЯМ) и собственно ЯМ по способу, подробно описанному в работах [12, 13].

Таким образом, в данной работе в качестве возможного механизма архитектурной реорганизации супраструктур хроматиновой матрицы рассматриваются особенности *Arg-X* протеолиза (см. рис. 2, 3) в связи с физиологией инициации роста и развития вегетативного периода зародышей яровой и озимой пшениц (рис. 1). На начальных этапах индивидуального развития внешние условия выполняют как бы канализирующую роль, определяя возможные параметры осуществления последующих процессов морфогенеза растения. По мнению Реймерса [14], проверка групповой всхожести семян (от 50–80% их

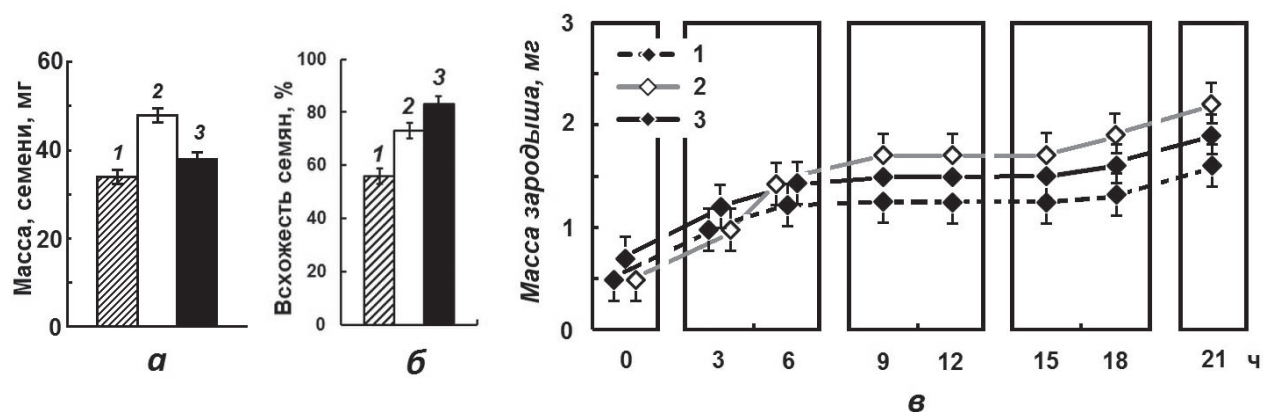


Рис. 1. Масса семян в состоянии биологического покоя (а), их всхожесть через 21 ч после начала набухания и проращивания (б); масса зародышей (в) пшениц сортов Артемовки (яровая) (1), выведенной из нее Мироновской 808 (озимая) (2) и выведенной из последней Мироновской яровой (3)

жизнеспособности) характеризует коллективную сумму наследственных свойств фона «генетической целостности» генотипа всей группы. Как видно из рис. 1, а, различия между семенами, используемыми в нашем эксперименте, уже проявляются на уровне их морфологической целостности. По массе семена озимой пшеницы (2) тяжелее яровых (1, 3) (рис. 1, а). По-видимому, это связано с накоплением трофической и защитной основы, необходимой зародышу для выживания в стрессовых условиях окружающей среды. Кроме того, из рис. 1, б видно, что происходит интенсивное увеличение массы зародыша озимых семян (9 ч → 21 ч) в сравнении с массой зародыша семян ярового сорта, из которого он выведен. Возможно, этот период связан с усиленным питанием зародыша от эндосперма. Все эти особенности сорта Мироновской 808, по-видимому, связаны со стрессовым характером эпигенетической памяти, о которой сообщается в статье [15]. Рис. 1, б показывает увеличение «всхожести» семян Мироновских озимой и яровой. Установлено, что появление ранних всходов приводит к увеличению урожайности растений. По сообщению [16], большинство современных коммерческих сортов имеют низкий уровень состояния покоя и восприимчивы к прорастанию в процессе сбора урожая. Это вызывает значительную потерю урожая и качества зерна, являясь серьезным препятствием на пути получения пшеницы. В связи с этим возникает проблема необходимости на данном этапе включения промежуточного уровня покоя элитных семян. Особое внимание уделяется исследованию ядерного протеома растений, которые, как считает Касати, находятся на начальном этапе [17]. Однако о состоянии протеома и модификации гистонов клеточных ядер проростков кукурузы под влияние фитогормонов была опубликована работа еще в 1975 г. [18, 19]. Главная задача эндосперма состоит в том, чтобы служить источником питательных веществ для развивающегося зародыша [20]. Однако следует отметить, что именно при развитии эндосперма происходит крупное перепрограммирование (перестройка) транскрипции



Рис. 2. Протеолитический *Arg-X* процессинг в супраструктурах интерфазных клеточных ядер зародышей пшениц сортов: Артемовки (яровая) (1), выведенной из нее Мироновской 808 (озимая) (2) и выведенной из последней Мироновской яровой (3)

генов в ядрах эндосперма, которое связано с началом налива зерна и осуществляется параллельно с изменением структуры хроматина. Одной из важных проблем в молекулярно-генетических системах развития является вопрос о роли передачи сигналов ядерных рецепторов в морфогенезе. Известно, что гуанидиновая группа гидрофильной аминокислоты аргинина, которой богат протеом клеточного ядра, служит центром взаимодействия в биологических рецепторах. Многочисленные представления о пространственной организации эукариотического генома базируются прежде всего на результатах, полученных с использованием биохимического метода 3С, отражают лишь закономерности об укладке хроматиновой фибриллы, характерные для гетерогенной популяции клеток, а не для отдельно взятой клетки [3]. Значительное место в исследовании механизмов экспрессии генов продолжает занимать изучение свойств тотального хроматина, выделенного из тканей, различающихся по количеству работающих генов или по интенсивности их функционирования. В статьях [21, 22] приводятся многочисленные экспериментальные данные, на основе которых делается вывод, что активация хроматина носит ступенчатый (волнообразный) характер. По их данным, первоначальное увеличение веса за

родышей коррелирует по времени с первой волной активации хроматина. На рис. 3 представлена схема локализации экранируемости к протеазо-процессингу белков супраструктур интерфазной хроматиновой матрицы в условиях адаптации вегетативной фазы пшеницы к стресс-факторам окружающей среды. Значительное место в исследовании механизмов экспрессии генов продолжает занимать изучение свойств тотальной хроматиновой матрицы, блоки которой могут быть представлены: нуклеоплазмой, где были выявлены диспергированные нити ДНК, которые В.Г. Коначев [23] назвал «лабильным хроматином»; хроматином непрочно- (эу-) и прочно- (гетеро-) связанным с ядерным матриксом. Заслуживает внимания наличие в клеточных ядрах межхромосомных нитей, которые разрываются под действием ДНКазы, а под действием трипсина или РНКазы становятся менее упругими [24]. Что касается концепции ядерного матрикса как скелетной основы клеточного ядра, то считают, что она себя исчерпала [25]. Однако формируется представление, что упакованный геном является платформой для функциональной компартиментализации клеточного ядра [25]. В стиле классической мысли философского мышления Рене Тома [4] ядерный матрикс может быть представлен как «эпигенетический полиэндр, включающий понятия сущности многообразия дифференциальной топологии векторных полей и динамических систем для специфической биологии развития». В данной работе клеточные ядра зрелых зародышей пшеницы используются как модельная система, где схематично показаны участки возможной реорганизации супраструктур хроматиновой матрицы при участии *Arg-X* протеолиза (рис. 3) [26].

Набухание семени – пусковой фактор прорастания, связанный с активным водопоглощением, где вода играет роль теплового буфера и растворителя, вызывая резкое увеличение энергетического заряда АТФ и изменение подвижности протонов. Все эти факторы способствуют образованию сигнальных систем ядерных рецепторов в осо-

бенностях морфогенеза. Поступление тепловой энергии воды в гетерополимерные супраструктуры клеточных ядер индуцируют не только ограниченный протеолиз, но и окислительно-восстановительные реакции, одним из главных эффектов которых может быть образование АФК, запускающих системы цепных полимеризационных процессов. Генерация АТФ может быть вызвана активностью протеиназ [27, 28].

Если исходить от гипотетической структурной укладки хроматина, то зоны инициации генетических программ развития у Артемовки при участии *Arg-X* процессинга находятся в пусковой готовности на уровне траектории супраструктур эухроматина (ХрI) в воздушно-сухих зародышах и в процессе активного водопоглощения, а при метаболизме воды в семени и субклеточных структурах соединяются с ЯМ – полиэндром упакованного генома для функциональной компартиментализации клеточного ядра (см. рис. 2, 3).

У озимого сорта при участии *Arg-X* процессинга перепрограммирование генетической программы развития начинается только при максимальном метаболизме воды в семени и субклеточных структурах на уровне ЯМ (см. рис. 2, 3), т.е. полиэндра упакованного генома для функциональной компартиментализации клеточного ядра, где сформировались точки адаптированной деконденсации хроматина и траектории дальнейшего хода сигнальной системы в развитии ростового морфогенеза зародыша.

У Мироновской яровой при участии *Arg-X* протеолитического процессинга генетическая программа развития иницируется в процессе активного набухания на уровне гетерохроматина и в дальнейшем распространяется по хроматиновым фибриллам, прочносвязанным с ЯМ.

Таким образом, у всех трех сортов разные траектории прохождения сигнальных систем в супраструктурах хроматиновой матрицы. Возможно, *Arg-X* протеолиз выполняет также роль резонансного усиления индукции ростового морфогенеза и выступает в роли биохимического

Физиологические особенности семян		
Биологический покой: воздушно-сухое состояние (0ч)	Процесс водопоглощения: набухание под водой в течение 3ч	Метаболизм воды в семени и субклеточных структурах в течение 3ч
Артемовка (яровая)		
Мироновская 808 (озимая)		
Мироновская Яровая		
Характеристика клеточных ядер и хроматина зародышей семян		
Ядра занимают около половины объема клеток. Хроматин в виде крупных компактных тяжей (хромонем). Развитая сеть РНП-фибрилл в межхромосомных участках ядра [26]	Объем ядер увеличивается: появляются многочисленные вакуоли, сообщающиеся с нуклеоплазмой. Хроматиновые структуры более рыхлые. Увеличивается сеть межхромонемных РНП-фибрилл [26]	Вакуоли уменьшаются. Рыхлые глыбки хроматина равномерно распределены по всему ядру. Начало деконденсации хроматина [26]. Завершающий этап первой транскрипционной активации хроматина через 6 ч
Обозначение супраструктур клеточного ядра:		
<ul style="list-style-type: none"> ○ Нп - Нуклеоплазма - диспергированные (10 нм нуклеосомные) нити ДНК (лабильный хроматин); ▬ Хр I - "30 нм (?)" хроматиновые (эу-) фибриллы: непрочносвязанные с ЯМ; богатые транскрипционно активными зонами; □ Хр II - прочносвязанный с ЯМ с четкой компартиментализацией гетерохроматин; △ ЯМ - ядерный матрикс - "полиэндр" упакованного генома для функциональной компартиментализации клеточного ядра. <p>Черный цвет указывает на супраструктуры проявления Arg-X протеолиза.</p>		

Рис. 3. Схема распространения Arg-X протеолитической системы в супраструктурах интерфазных клеточных ядер зародышей пшениц

мической связи, которая воспроизводит механическое соотношение. Известно, что в клеточных ядрах белковые компоненты обогащены главным образом аминокислотами с резонирующим эффектом (аргинин, лизин), аминно- и гуанидиновые группы которых соответственно протонированы [29]. Механизм специфического расщепления пептидных связей (вблизи двойных связей – аминокислот) сериновой протеиназой еще ждет своего решения. Возможно, эта проблема будет решаться с применением стереоэлектронной теории Делоншама [см. 30]. Расположение хромосомных территорий имеет важное значение для процессов репликации, транскрипции, репарации и рекомбинации. По всей вероятности, филогенетическая принадлежность вида, клеточный цикл, состояние дифференциации влияют на архитектуру интерфазного ядра. Считают, что имеются морфологические ограничения и эпигенетические воздействия на ядерную архитектуру, эволюционную стабильность механизмов хромосомных территорий и изменения ядерной архитектуры [31]. Мы предположили, что молекулярный морфогенез на уровне надмолекулярных структур клеточного ядра может быть связан с ослаблением межнадмолекулярных белковых связей, выраженных чувствительностью к *Arg-X* протеолитическому процессингу. Возможно, наши экспериментальные данные будут полезны для тех, кто занимается разработкой логико-математических схем теории биологической специфичности, о которых писали Ж.-М. Лен [7], Р. Том [4], в области сложной проблемы динамики молекулярного и супрамолекулярного морфогенеза в условиях взаимодействия генотипа и среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-04-31243.

Литература

1. The EPIC Planning Committee. Reading the Second Code: Mapping Epigenomes to Understand Plant Growth, Development, and Adaptation to the Environment // *The Plant Cell*. 2012. V. 24. P. 2257–2261. DOI: 10.1105/tpc.112.100636.
2. Эллис С.Д., Дженювейн Т., Рейнберг Д. Эпигенетика / пер. с англ. М.: Техносфера, 2010. 496 с.
3. Гушанская Е.С., Гаврилов А.А., Разин С.В. Пространственная организация интерфазных хромосом и роль динамики хроматиновой фибриллы в позиционировании элементов генома // *Молекулярная биология*. 2014. Т. 48, № 3. С. 386–394.
4. Том Р. Структурная устойчивость и морфогенез. М.: Логос, 2002. 280 с.
5. Tiang C.L., He Y., Pawlowski W.P. Chromosome Organization and Dynamics during Interphase, Mitosis, and Meiosis in Plants // *Plant Physiol*. 2012. V. 158. P. 26–34. DOI: 10.1104/pp.111.187161.
6. Albrecht-Buhler G. In defense of non-molecular cell biology // *Int. Rev. of cytology*. 1990. № 120. P. 191–241.
7. Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия: Концепции и перспективы / пер. с англ. Новосибирск: Наука, 1998. 334 с.
8. Purohit J.S., Chaturvedi M.M., Panda P. Histone proteases: the tale of tail clippers // *Int. J. Int sci. Inn. Tech*. 2012. V. 1, № 1. P. 51–60.
9. Ремесло В.Н. Озимая пшеница Мироновская 264 и Мироновская 808. М.: Колос, 1964. С. 52–53.
10. Туманов И.И. Физиология закаливания и морозостойкости растений. М.: Наука, 1979. 350 с.
11. Иванова Э.А., Вафина Г.Х. Способ выделения растительных клеточных ядер: а.с. № 1701747 // *Бюллетень изобретений*. 1991. Т. 48. С. 98.
12. Иванова Э.А., Вафина Г.Х. Способ получения ядерных фракций, обладающих протеиназной и ингибирующей активностью: а.с. № 1733471 // *Бюллетень изобретений*. 1992. Т. 18. С. 96.
13. Иванова Э.А., Вафина Г.Х., Иванов Р.С. Анализ локализации протеазочувствительных сайтов *Arg-X* в динамике супраструктур интерфазного хроматина при индукции ростового морфогенеза зрелых зародышей яровой и озимой пшеницы // *Физиология растений и генетика*. 2014. Т. 46, № 3. С. 202–211.
14. Реймерс Ф.Э. Растение во младенчестве. Новосибирск: Наука, 1987. 183 с.
15. Amasino R. Vernalization, competence and the epigenetic memory of winter // *The Plant Cell*. 2004. V. 16. P. 2553–2559.
16. Gao F., Ayele B.T. Functional genomics of seed dormancy in wheat: advances and prospects // *Front Plant Sci*. 2014. V. 5, № 458. DOI: 10.3389/fpls.2014.00458.
17. Casati P. Recent advances in maize nuclear proteomic studies reveal histone modifications // *Front Plant Sci*. 2012. V. 3, №278. DOI: 10.3389/fpls.2012.00278.

18. Иванова Э.А., Гилязетдинов Ш.Я., Ахметов Р.Р. Модификация гистонов растений и влияние фитогормонов на активность этого процесса // Растительные белки и их биосинтез. М.: Наука, 1975. С. 301–305.
19. Иванова Э.А., Ахметов Р.Р. Модификация негистоновых белков в проростках растений // Физиология растений. 1987. Т. 34, № 3. С. 507–512.
20. Olsen O.A. Nuclear endosperm development in cereals and *Arabidopsis thaliana* // Plant Cell. 2004. V. 16. P. S214–S227. DOI: 10.1105/tpc.017111.
21. Зеленин А.В., Куц А.А. Активация хроматина и некоторые проблемы регуляции генетической активности в эукариотической клетке // Молекулярная биология. 1985. Т. 19, № 1. С. 285–294.
22. Троян В.М., Калинин Ф.Л. Изменение свойств хроматина на ранних этапах прорастания семян // Физиология и биохимия культурных растений. 1985. Т. 17, № 3. С. 219–230.
23. Конарев В.Г. Морфогенез и молекулярно-биологический анализ растений. Изд. 2-е, доп. СПб.: ВИР, 2001. 417 с.
24. Подгорная О.И., Кузнецов И.С., Енукашвили Н.И., Шатрова А.Н., Аксенов Н.Д., Зенин В.В., Нониашвили Е.Н., Дыбан А.П. Исследование «нити», связывающей хромосомы // Цитология. 2005. Т. 47, № 9. С. 825.
25. Разин С.В., Борунова В.В., Яровая О.В., Васецкий Е.С. Ядерный матрикс и структурно-функциональная компартиментализация ядра эукариотической клетки // Биохимия. 2014. Т. 79, № 7. С. 770–781.
26. Аветисова Л.В., Кадыков В.А. Ультраструктура апикальной меристемы проростков пшеницы при низких положительных температурах // Цитология. 1985. Т. 27. С. 28–32.
27. Никандров В.И., Судник Ю.М., Пыжова Н.С. Генерирование активных форм кислорода протеиназами и трипсиногеном в водно-солевых растворах // Докл. АН Белоруси. 1992. Т. 36, № 11–12. С. 1034–1039.
28. Иванова Э.А., Вафина Г.Х. Антиоксидантная активность пероксидазной системы надмолекулярных структур клеточных ядер в постэмбриональной фазе онтогенеза пшеницы // Вестник национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. 1999. № 2. С. 25–29.
29. Олфри В., Пого Б., Пого А., Клейнсмид Дж., Мирский А. Метаболическое поведение хроматина // Гистоны и перенос генетической информации. М.: Мир, 1968. С. 59–88.
30. Еремеев Н.Л., Карякин А.А., Казанская Н.Ф. Кинетика растворения твердых белковых субстратов протеиназами. Выбор механизма реакции // Биохимия. 1989. Т. 54, № 3. С. 503–510.
31. Schubert I., Shaw P. Organization and dynamics of plant interphase chromosomes. // Trends in Plant Science. 2011. V. 16, № 5. P. 273–281. DOI: 10.1016/j.tplants.2011.02.002.

—•••—

SUPRAMOLECULAR AND BIOCHEMICAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF WHEAT INTERPHASE CHROMATIN REORGANIZATION UNDER STRESS

© E.A. Ivanova, G.H. Vafina, R.S. Ivanov

Ufa Institute of Biology, Russian Academy of Sciences,
69, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

This paper shows that during many-year adaptation to cold shock in winter wheat embryos (on dormancy release) there is an increase in the total shielding of arginine-X to protease processing at the *suprastructural* level of the *chromatic* “nuclear matrix” organization in the final phase of the first wave of its activation. Perhaps these are the zones that affect the architectural organization of the cell nucleus capable of being reprogrammed in order to survive under severe environmental conditions.

Key words: wheat, proteomics, cell nucleus, supramolecular biochemistry, *Arg-X* proteolysis.

УДК 581.93

АДВЕНТИВНАЯ ФРАКЦИЯ ФЛОРЫ ГОРОДА ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО

© Е.А. Девятова, Л.М. Абрамова, О.А. Чернягина

Представлены результаты изучения адвентивного компонента флоры г. Петропавловска-Камчатского. Адвентивный компонент флоры представлен 117 видами, относящимися к 28 семействам и 92 родам. В спектре ведущих семейств ведущее положение занимают *Poaceae* (19 видов, 16.26%), *Asteraceae* (18 видов, 15.42%), *Polygonaceae* (12 видов, 10.26%), *Fabaceae* (9 видов, 7.69%), *Brassicaceae* (8 видов, 6.84%), *Caryophyllaceae*, *Rosaceae* (по 7 видов, 5.98%), в родовом спектре – роды *Poa* (5 видов, 4.27%) и *Rumex* (4 вида, 3.42%). Большинство видов относятся к гемикриптофитам (58.97%), велика доля терофитов (28.21%). Ведущей экологической группой по отношению к условиям увлажнения является мезофильная (80.34%), по отношению к условиям освещения преобладают гелиофиты (86.32%). Во флорогенетическом спектре преобладают евразийские виды (21.37%) и голарктические виды (12.82%). Все заносные виды являются неофитами. Основную роль в формировании адвентивного компонента играет случайный занос (64.96% от общего видового состава адвентов). По степени натурализации ведущую позицию занимают эпекофиты (81.20%), расселяющиеся по нарушенным местообитаниям, доля колонофитов невелика – 11,96%. Особое внимание необходимо уделять *Heracleum sosnowskyi* и *Impatiens glandulifera*, являющимися опасными инвазивными видами.

Ключевые слова: Камчатка, синантропная флора, адвентивный компонент флоры.

Введение. Адвентизация флоры является одной из специфических особенностей городских территорий, связанной с активной хозяйственной деятельностью и преобразованием условий окружающей среды, особенно в синантропных местообитаниях [1]. Адвентивная фракция является динамичной системой, формирование которой зависит от ряда факторов: степени изученности территории, ее хозяйственного освоения, характера взаимодействия с другими регионами [2].

В целом синантропная флора Камчатки обследована лишь фрагментарно, необходима ее полная инвентаризация. В связи с этим с 2012 г. начато обследование территории города Петропавловска-Камчатского [3–5], где в настоящее время в связи с развитием жилищ-

ного строительства, сети дорог и автомобильного транспорта и обустройством городских территорий наблюдается распространение адвентивных неофитов. Результаты проведенной работы приводятся в настоящей статье.

Характеристика района исследования. Петропавловск-Камчатский расположен вдоль восточного побережья Авачинской бухты Тихого океана (координаты 53°012 с.ш. 158°392 в.д.), протяженность его составляет 25 км. Город имеет ярко выраженный горный рельеф, абсолютные высоты колеблются от 0 до 380 м. Район Петропавловска-Камчатского находится в восточной приморской подобласти и характеризуется морским климатом с избыточным

ДЕВЯТОВА Елизавета Александровна, Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, e-mail: devyatovaea@mail.ru

АБРАМОВА Лариса Михайловна – д.б.н., Ботанический сад-институт Уфимского научного центра РАН, e-mail: abramova.lm@mail.ru

ЧЕРНЯГИНА Ольга Андреевна, Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, e-mail: kamchatika@mail.ru

увлажнением. Основным климатообразующим процессом является активная циклоническая деятельность, особенно в осенне-зимний период [6]. Средняя годовая температура воздуха +2,1°C. Средние суточные температуры в январе –8,7°C, в августе +14°C. Период вегетации с 22 мая по 14 октября. Среднегодовое количество осадков составляет 1300 мм, 56% приходится на холодный период. Число дней со снежным покровом в городе составляет 177 дней, средняя максимальная высота снежного покрова составляет 136 см. Город является административным, культурным и промышленным центром Камчатского края.

Материалы и методы исследования. Полевые исследования проводились в течение 2012–2015 гг. маршрутным методом. Определение растений проводилось по «Определителю сосудистых растений Камчатской области» [7], сводке «Сосудистые растений советского Дальнего Востока» [8], названия приведены по С.К. Черепанову [9]. Биоморфологическая структура анализировалась по К. Раункиеру [10] и И.Г. Серебрякову [11] с использованием сводки «Жизненные формы семенных растений российского Дальнего Востока» [12]. Флорогенетические группы выделены на основе системы фитохорий А.Л. Тахтаджяна [13]. Экологические характе-

Т а б л и ц а 1

*Систематическая структура адвентивного компонента флоры
Петропавловска-Камчатского*

Систематическая группа	Количество видов		Количество родов	
	Абс.	%	Абс.	%
Liliopsida, в том числе:	23	19.66	16	17.40
<i>Poaceae</i>	19	16.26	12	13.04
<i>Amaryllidaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Commelinaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Convallariaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Zannicheliaceae</i>	1	0.85	1	1.09
Magnoliopsida, в том числе:	94	80.34	76	82.60
<i>Asteraceae</i>	18	15.42	15	16.30
<i>Polygonaceae</i>	12	10.26	7	7.61
<i>Fabaceae</i>	9	7.69	7	7.61
<i>Brassicaceae</i>	8	6.84	7	7.61
<i>Caryophyllaceae</i>	7	5.98	5	5.43
<i>Rosaceae</i>	7	5.98	6	6.51
<i>Scrophulariaceae</i>	4	3.42	3	3.26
<i>Lamiaceae</i>	4	3.42	3	3.26
<i>Apiaceae</i>	4	3.42	4	4.34
<i>Boraginaceae</i>	3	2.56	3	3.26
<i>Ranunculaceae</i>	3	2.56	2	2.17
<i>Campanulaceae</i>	2	1.71	1	1.09
<i>Chenopodiaceae</i>	2	1.71	2	2.17
<i>Papaveraceae</i>	2	1.71	2	2.17
<i>Aceraceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Balsaminaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Cannabaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Oxalidaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Plantaginaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Polemoniaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Solanaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Valerianaceae</i>	1	0.85	1	1.09
<i>Violaceae</i>	1	0.85	1	1.09
Итого:	117	100	92	100

ристики видов растений выделены на основании фитоиндикационных шкал Г. Элленберга и Д.Н. Цыганова и литературных сведений [8, 14]. В работе использована классификация адвентивных видов по Ф.Г. Шредеру [15].

Результаты исследований. Адвентивный компонент флоры Петропавловска-Камчатского представлен 117 видами, относящимися к 28 семействам и 92 родам (табл. 1). Наивысшее положение в спектре ведущих семейств занимают *Poaceae* (19 видов, 16.26%), *Asteraceae* (18 видов, 15.42%), *Polygonaceae* (12 видов, 10.26%), *Fabaceae* (9 видов, 7.69%), *Brassicaceae* (8 видов, 6.84%), *Caryophyllaceae*, *Rosaceae* (по 7 видов, 5.98%). В родовом спектре нет ярко выраженного преобладания какого-либо рода, наивысшее положение занимают роды *Poa* (5 видов, 4.27%) и *Rumex* (4 вида, 3.42%).

Такое сочетание семейств и родов хорошо соотносится с адвентивным комплексом флоры Дальнего Востока России в целом [16]. К моновидовым относятся 13 семейств. Следует отметить, что семейства *Amaryllidaceae*, *Commelinaceae*, *Convallariaceae*, *Zannicheliaceae*, *Aceraceae*, *Cannabaceae*, *Solanaceae*, *Valerianaceae* представлены только заносными видами не только во флоре города, но и во флоре региона в целом. При анализе семейственно-родового спектра адвентивной флоры обращает на себя внимание следующая тенденция: лучшую адаптационную активность на рудеральных местообитаниях в целом имеют таксоны, характерные для более южных территорий: *Chenopodiaceae*, *Lamiaceae*, *Polygonaceae*, *Poaceae*, *Brassicaceae*, *Asteraceae* и *Caryophyllaceae*.

Проведенный анализ биоморфологической структуры адвентивной фракции

Т а б л и ц а 2

Спектр жизненных форм, по И.Г. Серебрякову

Жизненная форма	Количество видов	
	Абс.	%
Деревья	2	1.7
Кустарники	1	0.85
Лианы	1	0.85
Поликарпики:	73	62.40
многолетний стержнекорневой поликарпик	22	18.80
многолетний короткокорневищный-кистекокорневой поликарпик	15	12.82
многолетний короткокорневищный поликарпик	9	7.69
многолетний длиннокорневищный поликарпик	26	22.22
луковичный поликарпик	1	0.85
Монокарпики:	40	34.20
многолетний стержнекорневой монокарпик	1	0.85
одно-двулетний стержнекорневой монокарпик	35	29.91
одно-двулетний кистекокорневой монокарпик	4	3.40
Итого:	117	100

Т а б л и ц а 3

Спектр жизненных форм, по К. Раункиеру

Жизненная форма	Количество видов	
	Абс.	%
Фанерофиты	3	2.56
Хамефиты	2	1.71
Гемикриптофиты	69	58.97
Криптофиты	10	8.55
Терофиты	33	28.21
Итого	117	100

флоры (табл. 2, 3) города показал преобладание поликарпиков (62.40%), среди них: многолетние стержнекорневые (18.80%), многолетние короткокорневищные-кисте-корневые (12.82%), многолетние коротко-корневищные (7.69%), многолетние длин-нокорневищные (22.22%) и луковичные (0.85%).

Монокарпиков 34.20%, среди них встре-чаются многолетние стержнекорневые (0.85%), одно-двулетние стержнекорневые (29.91%), одно-двулетние кисте-корневые (3.40%). Среди адвентивных видов присут-ствуют деревья, кустарники и лианы. Боль-шинство видов относятся к гемикриптофитам (58.97%), велика доля терофитов (28.21%).

Т а б л и ц а 4

Экологические группы по отношению к условиям увлажнения

Экологические группы	Количество видов	
	Абс.	%
Гидрофиты	1	0.85
Гигрофильная группа:	13	11.11
Мезофильная группа:	94	80.34
Ксерофильная группа:	9	7.69
Итого:	117	100

Т а б л и ц а 5

Экологические группы по отношению к свету

Экологические группы	Количество видов	
	Абс.	%
Гелиофиты	101	86.32
Семигелиофиты	13	11.11
Сциофиты	3	2.57
Итого:	117	100

Т а б л и ц а 6

Флорогенетический спектр адвентивной фракции флоры Петропавловска-Камчатского

Центр происхождения	Количество видов	
	Абс.	%
Восточноазиатский	5	4.27
Гемикосмополитный	3	2.56
Гибридогенный	2	1.71
Голарктический	15	12.82
Евразийский	25	21.37
Евразийско-американский	2	1.71
Евро-западноазиатский	9	7.69
Евро-западносибирский	6	5.13
Евро-сибирский	3	2.56
Евро-сибирско-западноазиатский	1	0.85
Евро-югозападноазиатский	1	0.85
Европейский	5	4.27
Ирано-туранский	8	6.84
Кавказский	2	1.71
Североамериканский	10	8.55
Сибирский	2	1.71
Средиземноморский	10	8.55
Южноазиатский	6	5.13
Южноамериканский	1	0.85
Южноевропейский	1	0.85
Итого	117	100

В целом для антропогенных территорий характерна большая приспособленность гемикриптофитов (в связи с переуплотнением субстрата), а также травянистых видов, тяготеющих к двулетнему циклу.

Ведущей экологической группой по отношению к условиям увлажнения является мезофильная (табл. 4), представленная 94 видами (80.34%). Гигрофильная и ксерофильные группы представлены почти в равном количестве.

Среди экологических групп по отношению к условиям освещения (табл. 5) преобладают гелиофиты (86.32%), что определяется наличием большого количества открытых антропогенных местообитаний в городе.

Во флорогенетическом спектре (табл. 6) преобладают евразийские виды (21.37%), например: *Arctium tomentosum*, *Bromopsis inermis*, *Taraxacum officinale* и др. Второе место занимают голарктические виды (12.82%), такие как: *Geum aleppicum*, *Fallopia convolvulus*, *Plantago major* и др. В равной доле представлены североамериканские и средиземноморские виды (по 8.55%): *Lepidotheca suaveolens*, *Solidago canadensis*, *Galeopsis bifida*, *Spergula arvensis* и др. Флорогенетический спектр адвентивной фракции Петропавловска-Камчатского в целом подчеркивает преобладание видов с широкими ареалами и видов южного происхождения.

Все заносные виды являются неофитами. Основную роль в формировании адвентив-

ного компонента флоры Петропавловска-Камчатского играет случайный занос (64.96% от общего видового состава адвентов) (табл. 7). По степени натурализации ведущую позицию занимают эпекофиты (81.20%), расселяющиеся по нарушенным местообитаниям, доля колонофитов невелика – 11.96%. Группа агриофитов представлена 5 видами: *Potentilla norvegica*, *Stachys palustris*, *Heracleum sosnowskyi*, *Atriplex gmelinii*, *Impatiens glandulifera*. Особое внимание необходимо уделить *Heracleum sosnowskyi* и *Impatiens glandulifera*, являющимися опасными инвазивными видами. Периодически встречались такие виды, как *Helianthus annuus*, *Secale cereale*, *Xanthoxalis stricta*.

Заключение. Комплексный анализ современного состояния адвентивной фракции флоры Петропавловска-Камчатского позволил выявить ее характерные и специфические особенности. В целом семейственно-родовой спектр адвентивной флоры соотносится с комплексом адвентивной флоры Дальнего Востока. Современная адвентивная флора города сформирована успешно натурализовавшимися видами, составляющими основу антропогенных флористических комплексов. Для прогнозирования тенденций изменения адвентивной фракции флоры необходимо продолжение проведения мониторинговых исследований, изучение эколого-биологических особенностей адвентивных видов и их способности к гибридизации с аборигенными видами.

Т а б л и ц а 7

Структура адвентивной фракции флоры Петропавловска-Камчатского

Классификация адвентивных видов	Количество видов	
	Абс.	%
По времени заноса		
Неофиты	117	100
По степени натурализации		
Агриофиты	5	4.28
Колонофиты	14	11.96
Эфемерофиты	3	2.56
Эпекофиты	95	81.20
По способу заноса		
Ксенофиты	76	64.96
Эргазиофиты	41	35.04

Литература

1. Абрамова Л.М. Оценка уровня адвентизации синантропных ценофлор Зауралья Республики Башкортостан // Бюл. МОИП. Отд. биол., 2002. Т. 107, вып. 3. С. 83–88.
2. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России. М.: Геос, 2010. 512 с.
3. Девятова Е.А., Черныгина О.А. Флора исторической части г. Петропавловска-Камчатского // Проблемы изучения адвентивной и синантропной флоры России и стран ближнего зарубежья: Мат-лы IV Международной научной конференции (Ижевск, 4–7 декабря 2012 г.) / Удмуртский гос. ун-т, Московский гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, Русское ботаническое общество; под ред. О.Г. Барановой и А.Н. Пузырева. Ижевск: Институт компьютерных исследований: Удмуртский государственный университет, 2012. С. 73–76.
4. Черныгина О.А., Штрекер Л.В., Девятова Е.А. Адвентивные виды во флоре полуострова Камчатка // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: доклады XIV международной научной конференции. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2014. С. 113–121.
5. Абрамова Л.М., Девятова Е.А., Штрекер Л., Черныгина О.А. К характеристике ценопопуляций борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) в городе Петропавловске-Камчатском // Научные ведомости Белгородского университета. Естественные науки. 2014. Вып. 26, № 3 (174). С. 5–8.
6. Кондратюк В.И. Климат Петропавловска-Камчатского. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 167 с.
7. Определитель сосудистых растений Камчатской области / под ред. С.С. Харкевича и С.К. Черепанова. М.: Наука, 1981. 412 с.
8. Сосудистые растения советского Дальнего Востока / отв. ред. С.С. Харкевич. Л.: Наука, 1985–1996. Т. 1–8.
9. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
10. Raunkiaer C. The life forms of plants and statistical plant geography. Being the collected papers of C. Raunkiaer. Oxford, 1934. 47 p.
11. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений. М.: Высшая школа, 1962. 378 с.
12. Безделев А.Б., Безделева Т.А. Жизненные формы семенных растений российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2006. 296 с.
13. Тахтаджян А.Л. Флористические области Земли. Л.: Наука, 1978. 248 с.
14. Флора СССР: в 30 т. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1934–1964. Т. 1–30.
15. Schroeder F. G. Zur Klassifizierung der Anthroporen // Vegetatio. V. 16. N 5–6. 1969. S. 225–238.
16. Кожевников А. Е., Кожевникова З.В. Комплекс адвентивных видов растений как компонент природной флоры Дальнего Востока России: разнообразие и пространственное изменение таксономической структуры // Комаровские чтения. Вып. 58. 2011. С. 5–36.

ADVENTIVE FRACTION IN FLORA OF PETROPVLOVSK-KAMCHATSKY

© Е.А. Devyatova¹, Л.М. Abramova², О.А. Chernyagina³

¹ Vitus Bering Kamchatka State University,
4, ulitsa Pogranichnaya, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

² Botanical Garden-Institute, Ufa Scientific Centre, RAS,
195, ulitsa Mendeleeva, 450080, Ufa, Russian Federation

³ Kamchatka Branch of Pacific Institute (of Geography, FED RAS,
6, ulitsa Partizanskaya, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

The paper presents the investigation results on the adventive component in flora of Petropavlovsk-Kamchatsky. The adventive flora is represented by 117 species, 28 families and 92 genera. The dominant position belongs to *Poaceae* (19 species, 16.26%), *Asteraceae* (18 species, 15.42%), *Polygonaceae* (12 species, 10.26%), *Fabaceae* (9 species, 7.69%), *Brassicaceae* (8 species, 6.84%), *Caryophyllaceae*, *Rosaceae* (7 species, 5.98%), and the genera *Poa* (5 species, 4.27%) and *Rumex* (4 species, 3.42%). Most of the species are hemicryptophytes (58.97%), and 28.21% are terophytes. Mesophytes are a leading ecological group in relation to moisture conditions (80.34%), and heliophytes prevail in relation to lighting conditions (86.32%). Eurasian species (21.37%) and Holarctic species (12.82%) dominate in the florogenetic range. All adventive plants are neophytes. The random drift plays the main role in the formation of the adventive component (64.96%). According to the degree of naturalization, epiphytes spread over disturbed habitats (81.20%) are dominant over colonophytes (11.96%). Particular attention should be paid to dangerous invasive species *Heracleum sosnowskyi* and *Impatiens glandulifera*.

Key words: Kamchatka, synanthropic flora, adventive component.

УДК 582.579.2:581.55

К БИОЛОГИИ РЕДКОГО ВИДА РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

Iris scariosa Willd. ex Link

© А.В. Крюкова, Л.М. Абрамова

Приведены результаты исследования морфометрических показателей и семенной продуктивности редкого вида Республики Башкортостан *Iris scariosa* Willd. ex Link в природе и в условиях интродукции. Вид является эндемиком Юго-Востока европейской части России, включен в Красные книги РФ, РБ, Челябинской области и других регионов России. По большинству морфометрических параметров природные растения *I. scariosa* превосходят введенные в культуру. Для большей части параметров вида отмечено нормальное варьирование (6–45%). У *I. scariosa* на побеге образуются, как правило, 2 плода. Показатель реальной семенной продуктивности в природе ниже, чем в культуре – 48.4 шт. семян на 1 генеративный побег, что связано с тем, что природные местообитания *I. scariosa* располагаются в засушливых районах Башкирского Зауралья, а в условиях культуры растения могут лучше реализовать свой репродукционный потенциал. Семена *I. scariosa* полностью вызревают в природе, но сильно повреждаются вредителями. Для охраны вида необходима организация проектируемого ландшафтного заказника «Гора Айгиртау» в Хайбуллинском районе РБ. Введение вида в широкую культуру также будет способствовать сохранению его биоразнообразия.

Ключевые слова: *I. scariosa* Willd. ex Link, редкий вид, Башкирское Зауралье, морфометрия, семенная продуктивность, охрана.

Семейство *Iridaceae* Juss. (Касатиковые) включает свыше 200 видов, распространенных в большей части Северного полушария. Виды семейства освоили широкий диапазон местообитаний – от прибрежных до пустынных, поднимаясь и до высокогорий. Наибольшее число видов приходится на страны Средиземноморья, Юго-Западную и Среднюю Азию [1]. В Российской Федерации (РФ) максимальное таксономическое разнообразие рода наблюдается в Сибири [2].

Семейство *Iridaceae* в Республике Башкортостан (РБ) представлено 6 видами и 2 родами (*Iris* L. и *Gladiolus* L.), из которых наиболее распространенный род Касатик – *Iris* – включает 5 видов: *I. humilis* Georgi (к. низкий), *I. pseudacorus* L. (к. желтый или к. болотный), *I. pumila* L. (к. карликовый), *I. scariosa* Willd. ex Link (к. кожистый) и *I. sibirica* L. (к. сибирский) [3]. Этот род представлен, по преиму-

ществу, редкими видами декоративных растений, перспективных для культивирования в регионе Южного Урала и для проведения селекционной работы. До недавнего времени все 5 видов рода входили в Красную книгу РБ (2001) [4], но в последнем издании Красной книги РБ (2011) [5] *Iris sibirica* L. был исключен из числа редких видов как вид со стабильной численностью, не вызывающий опасения. Высокая представленность редких видов в составе семейства *Iridaceae* и рода *Iris* и их декоративные качества определяют актуальность исследований авторов.

Объектом исследования в данной работе является редкий вид РБ *I. scariosa* – коротко-корневищный травянистый многолетник с толстым ползучим корневищем, 10–20 см высотой, на верхушке прикрытый короткими буроватыми волокнами. Прикорневые листья в пучках широколинейные или почти ланце-

КРЮКОВА Анастасия Владимировна, Ботанический сад-институт Уфимского научного центра РАН, e-mail: abramova.lm@mail.ru

АБРАМОВА Лариса Михайловна – д.б.н., Ботанический сад-институт Уфимского научного центра РАН, e-mail: abramova.lm@mail.ru

товидные, 4–10 мм шириной, серповидно-изогнутые, почти равные длине стебля с цветком, одетые при основании перепончатыми листоносными влагалищами. Листочки обертки перепончатые, лилово-окрашенные, эллиптически-ланцетовидные, заостренные. Трубка околоцветника в 2–3 раза длиннее завязи и равна отгибу околоцветника [6]. Наружные доли околоцветника с обратнойцевидной лиловой, тупой, постепенно суженной к основанию в ноготок пластинкой, при основании с беловатой бородкой. Внутренние доли равны наружным, но уже их. Лопастности столбика заостренные и удлиненные. Стебель простой, с 3–4 листьями, на верхушке с 1 или 2 цветками. Цветки лиловые или синефиолетовые. Плод – продолговато-эллиптическая, шестигранная, к обоим концам заостренная коробочка. Цветет в конце апреля – начале мая. Опыляется насекомыми. Размножается семенами и вегетативно ветвлением корневища. Плодоносит в июне–июле [5].

I. scariosa – восточноевропейско-азиатский степной вид, распространенный в Восточной Европе (Нижнее Поволжье и Прикаспий), Западной Сибири, Средней и Центральной Азии. Иногда южно-уральские популяции рассматриваются в узких таксономических границах под названием *I. glaucescens* Bunge (к. сизоватый) [7]. Мезоксерофит. Произрастает в каменистых и солонцеватых степях. В РБ растет в местах с сильно разреженной растительностью – проективное покрытие травостоя около 30%. Почвы сильно хрящеватые, органогенно-щебнистые, иногда с признаками засоления. *I. scariosa* встречается в петрофитных сообществах с *Allium globosum*, *A. tulipifolium*, *Ferula tatarica*, *Festuca pseudovina*, *Orostachys spinosa*, *Seseli ledebourii*, *Stipa zalesskii*, *Tanacetum kittaryanum* и др. К естественным лимитирующим факторам для вида можно отнести его низкую конкурентоспособность, поздние заморозки во время цветения, засухи; к антропогенным – чрезмерный выпас скота [8].

I. scariosa включен в Красную книгу РБ (2011) с категорией и статусом редкости 1 – вид, находящийся под угрозой исчезновения.

I. scariosa является эндемиком Юго-Востока европейской части России. Вид также включен в Красные книги РФ и Челябинской области, охраняется во многих других регионах РФ [9]. Культивируется в ряде ботанических садов РФ: в Москве (МГУ), С.-Петербурге (БИН РАН), в Горном Ботаническом саду ДНЦ РАН и др. [10].

I. scariosa в Башкортостане – малоизученный вид с дизъюнктивным ареалом, обнаружен относительно недавно – в 1991 г. [8]. На сегодня достоверно известен из 8 пунктов Башкирского Зауралья в Хайбуллинском районе: в 3 км от с. Большеабишево в направлении д. Урняк, в 7.5 км к юго-востоку от д. Бакаловской фермы, в 3 пунктах на г. Айгиртау в окрестностях д. Сагитово и в 3 пунктах по берегам реки Таналык, в ее низовьях. Специальных ООПТ по охране данного вида в РБ на сегодня нет. Вид также обнаружен в Челябинской и Оренбургской областях [9].

Посадочный материал *I. scariosa* для интродукции в Ботанический сад-институт (БСИ УНЦ РАН) был мобилизован в 2013 г. из природных популяций в Хайбуллинском районе Зауралья РБ, при этом было собрано 15–35 фрагментов растений (небольшая часть корневища с 1–2 побегами) с каждой популяции.

Измерения морфометрических параметров в природе и условиях культуры, в БСИ УНЦ РАН, проводились в фазе цветения вида в мае 2014–2015 гг. по стандартным методикам [11]. Семенную продуктивность вида определяли в 2014 г. в природе и культуре по общепринятой методике [12, 13]. Подсчитывали потенциальную семенную продуктивность (количество семян на 1 побег – ПСП), реальную семенную продуктивность (количество семян на 1 побег – РСР) и коэффициент семенной продуктивности (отношение реальной семенной продуктивности к потенциальной семенной продуктивности – Кпр.).

Статистическая обработка данных проведена по общепринятой методике в MS EXCEL 2010 с использованием стандартных показателей [14]. При статистическом анализе количественных показателей рассчитывали средние арифметические значения, сред-

неквадратичное отклонение σ , ошибку среднего, коэффициент вариации – C_V [15].

Результаты морфометрических измерений представлены в табл. 1. По данным таблицы видно, что параметры природных ценопопуляций значительно отличаются от интродукционных. Большинство параметров *I. scariosa* в интродукции меньше природных: диаметр куста, число лопаток, число генеративных побегов, длина побега. Это, скорее всего, связано с тем, что в культуру этот вид введен недавно. Значительное варьирование параметров наблюдается для числа генеративных побегов (C_V – 60%), нормальное (C_V – 6–45%) – для большинства параметров.

Результаты изучения семенной продуктивности *I. scariosa* приведены в табл. 2. *I. scariosa*, у которого на побеге образуются, как правило, 2 плода, в природе имеет пока-

затель реальной семенной продуктивности ниже, чем в культуре – 48.4 шт. семян на 1 генеративный побег.

Проведенные исследования показали, что по большинству морфометрических параметров природные растения *I. scariosa* превосходят введенные в культуру, что, возможно, объясняется тем, что растения привезены недавно. По параметрам семенной продуктивности можно судить о том, что в интродукции образуется больше семян на 1 плод, это связано с тем, что природные местообитания этого вида ириса располагаются в засушливых районах Башкирского Зауралья, а в условиях культуры ирис кожистый может лучше реализовать свой репродукционный потенциал. Семена *I. scariosa* полностью вызревают в природе, но сильно повреждаются вредителями.

Т а б л и ц а 1

Некоторые средние морфометрические показатели редких видов рода *Iris. L.* в условиях природы и культуры в 2014 и 2015 гг.

Показатели	В природе		В культуре	
	2014	2015	2014	2015
Диаметр куста, см	43.91±1.57	53.08±2.70	20.21±1.68	28.20±1.76
C_V , %	24.3	25.8	24.0	23.7
Число лопаток, шт.	51.63±3.49	77.92±5.87	17.84±3.60	27.35±3.54
C_V , %	45.0	38.7	49.0	37.4
Число листьев в лопатке, шт.	5.88±0.07	4.82±0.12	6.00±0.09	5.78±0.10
C_V , %	8.4	11.0	8.8	10.0
Длина листа, см	13.79±0.46	16.02±0.42	13.80±0.76	14.05±0.64
C_V , %	21.2	13.0	23.0	22.1
Ширина листа, см	1.47±0.06	1.52±0.04	1.45±0.07	1.50±0.05
C_V , %	23.0	14.2	24.2	20.3
Число генеративных побегов, шт.	14.88±1.35	15.12±1.09	4.36±1.46	6.78±1.30
C_V , %	58.0	30.8	60.0	31.2
Длина генеративного побега, см	15.97±0.49	18.26±0.46	14.76±0.49	15.73±0.50
C_V , %	20.4	12.3	14.8	13.4
Диаметр цветка, см	5.65±0.07	6.08±0.12	5.80±0.09	6.00±0.10
C_V , %	8.0	9.8	9.0	7.8

Т а б л и ц а 2

Средние показатели семенной продуктивности *I. scariosa* в природе и культуре в 2014 г.

Места произрастания	Число невыпол. семян, шт.	Число выпол. семян на 1 плод, шт.	ПСП на 1 генератив. побег	РСП на 1 генератив. побег	К пр., %
В природе	33.5±1.10	24.2±0.92	67.0±2.20	48.4±1.84	72.2
В культуре	28.7±2.03	30.5±1.80	81.3±3.51	55.4±2.55	68.1

Таким образом, *I. scariosa* в РБ относится к малоизученным видам, имеющим лишь несколько небольших локалитетов на юге Зауралья, он находится под угрозой исчезновения. На сегодня охрана данного вида никак не организована. Для охраны вида необходима организация проектируемого ландшафтного заказника «Гора Айгиртау», где вид обнаружен в 2 пунктах. Введение вида в широкую культуру может также способствовать сохранению его биоразнообразия.

Литература

1. Алексеева Н.Б. Род *Iris* L. (*Iridaceae*) в России // *Turczaninowia*. 2008. V. 11(2). С. 5–68.
2. Доронькин В.М. *Iris* L. Касатик // Флора Сибири. 1987. Т. 4. С. 114–124.
3. Крюкова А.В., Мулдашев А.А., Голованов Я.М., Абрамова Л.М. Распространение и фитоценотическая приуроченность редких видов рода *Iris* L. на Южном Урале (Республика Башкортостан) // Научные ведомости Белгородского гос. унта. Сер. Естественные науки. 2014. № 23 (194). Вып. 29. С. 5–11.
4. Красная книга Республики Башкортостан. Т. 1. Редкие и исчезающие виды высших сосудистых растений. Уфа: Китап, 2001. 280 с.
5. Красная книга Республики Башкортостан. В 2 т. Т 1: Растения и грибы / под ред. д-ра биол. наук, проф. Б.М. Миркина. 2-е изд., доп. и переработ. Уфа: МедиаПринт, 2011. 384 с.
6. Литвинская С.А., Муртазалиев Р.А. Флора Северного Кавказа: атлас-определитель. М.: Фитон XXI, 2013. 688 с.
7. Куликов П.В. Конспект флоры Челябинской области (сосудистые растения). Екатеринбург, 2005. 537 с.
8. Мулдашев А.А. Флористические находки в Башкортостане (Россия) // Бот. журн. 2003. Т. 88, № 1. С. 120–129.
9. Красный список особо охраняемых редких и находящихся под угрозой исчезновения животных и растений. Ч. 3.1 (Семенные растения). М.: Наука, 2004 (2005). 352 с.
10. Рябинина З.Н., Князев М.С. Определитель сосудистых растений Оренбургской области. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 758 с.
11. Голубев В.Н. Эколого-биологические особенности травянистых растений и растительных сообществ лесостепи. М.: Наука, 1965. 286 с.
12. Вайнагий И.В. О методике изучения семенной продуктивности // Бот. журн. 1974. Т. 59, № 6. С. 826–830.
13. Работнов Т.А. Методы изучения семенного размножения травянистых растений в сообществах // Полевая геоботаника. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 2. С. 20–40.
14. Зайцев Г.Н. Математика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1990. 296 с.
15. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.

ON THE BIOLOGY OF *Iris scariosa* Willd. ex Link, A RARE SPECIES OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

© A.V. Kryukova, L.M. Abramova

Botanical Garden-Institute, Ufa Scientific Centre, RAS,
195/3, ulitsa Mendeleeva, 450080, Ufa, Russian Federation

The paper presents the results of studying morphometric parameters and seed productivity of *Iris scariosa* Willd. ex Link, a rare species in Bashkortostan, in nature and under introduction conditions. The species is endemic to the southeast of the European part of Russia and is included into the Red Data Book of the Russian Federation, Belarus, Chelyabinsk Region and other regions of Russia. Judging by morphometric parameters, natural plants *I. scariosa* exceed those introduced into culture. Normal variation (6-45%) is typical for the majority of the species parameters. As a rule, *I. scariosa* bears two fruits on its offspring. The real seed productivity index in nature is lower than in culture comprising 48.4 pc per 1 generative shoot. This is explained by the fact that natural habitats of *I. scariosa* are located in arid regions of the Bashkir Trans-Urals, whereas in culture the plants can better realize their reproduction potential. Seeds of *I. scariosa* become fully mature in nature, but are badly damaged by pests. In order to protect the species it is necessary to organize the Mount Aygirtau Landscape Reserve planned in Haybullinskiy district of the Republic of Bashkortostan. Introduction of the species into a wider culture will also contribute to the conservation of its biodiversity.

Key words: *I. scariosa* Willd. ex Link, rare species, Bashkir Trans-Urals, morphometry, seed productivity, protection.

УДК 576.5

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОМЕГАКАРИОЦИТОВ ЧЕЛОВЕКА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ *EX VIVO*

© Д.Ю. Ключников, М.Ю. Языкова, Л.М. Трусова, С.Е. Волчков, О.В. Тюмина

В связи с развитием высокотехнологичных видов медицинской помощи во всем мире растет необходимость в донорских компонентах крови, в том числе тромбоцитах. В связи с этим с применением новейших клеточных технологий ведется разработка моделей и протоколов по получению мегакариоцитов, предшественников мегакариоцитов и тромбоцитов человека из гемопоэтических стволовых клеток (ГСК) в условиях *ex vivo* для клинического применения. Мегакариоцитарные предшественники (промегакариоциты), полученные *ex vivo*, могут применяться для снижения длительных тромбоцитопений у пациентов, перенесших трансплантацию ГСК из пуповинной крови. В настоящей работе предложен однофазный протокол по получению промегакариоцитов человека с экспансией CD34+ГСК. Удалось получить увеличение общего количества CD34+ клеток с $0.668 \pm 0.055 \times 10^6$ до $5.453 \pm 0.204 \times 10^6$ на 5 сутки. Пик образования промегакариоцитов (CD34+/CD41a+ клеток) приходился на 10 сутки, а их количество достигало $18.8 \pm 1.414\%$ от общей популяции клеток. Присутствие промегакариоцитов было подтверждено при помощи световой микроскопии.

Ключевые слова: клеточные технологии, стволовые клетки, гемопоэтические клетки, ГСК, промегакариоциты, мегакариоцитарные предшественники, мегакариоциты, тромбоциты, *ex vivo*.

Введение. Донорство крови и ее компонентов имеет общегосударственное стратегическое значение, затрагивает вопросы национальной безопасности и является одним из основных вопросов отечественного здравоохранения. Переливание крови и ее компонентов делают полтора миллионам россиян ежегодно, а каждый третий житель Земли хоть раз нуждался в донорской крови. Помимо увеличения необходимости в компонентах крови в хирургической, акушерской, педиатрической, онкологической и гематологической практике, в последние годы появляется необходимость обеспечения ими и активно развивающиеся высокотехнологичные медицинские технологии, к которым можно отнести

трансплантацию гемопоэтических стволовых клеток (ГСК). Эти методы все шире внедряются в практику, что сопряжено с увеличением потребности в донорской крови и ее компонентов [1]. В то же время общее число станций и отделений переливания крови в России уменьшается (за 2013 г. их количество уменьшилось на 6.9 и 12.7% по сравнению с 2012 г.), а объем заготовки тромбоцитарного концентрата за этот период упал на 1% [2]. По мнению специалистов, в ближайшее время Россия столкнется с дефицитом доноров крови и ее компонентов в силу того, что предполагается увеличение в разы количества высокотехнологичных операций в кардиологии, ортопедии и онкологии [1]. Несмотря на то,

КЛЮЧНИКОВ Дмитрий Юрьевич, Самарский государственный университет, e-mail: dmklju@gmail.com

ЯЗЫКОВА Марина Юрьевна – д.б.н., Самарский государственный университет,
e-mail: yazykovasamgu@mail.ru

ТРУСОВА Лариса Михайловна, Самарский областной центр планирования семьи и репродукции,
e-mail: trusova@cordbank.ru

ВОЛЧКОВ Станислав Евгеньевич – к.м.н., Самарский областной центр планирования семьи и репродукции, e-mail: quality@cordbak.ru

ТЮМИНА Ольга Владимировна – д.м.н., Самарский областной центр планирования семьи и репродукции, e-mail: director@cordbank.ru

что острого дефицита компонентов крови в России нет и значительное количество проблем службы крови решено благодаря реализации национального проекта «Здоровье», состояние донорства все еще остается сложным в связи с тем, что в период 1992–2007 гг. были утрачены многие пути поощрения донорства, престиж и механизмы взаимодействия с организациями как источниками донорских ресурсов [3, 4]. В связи с тем, что основной задачей на сегодняшний день является увеличение количества кадровых доноров, а по истечению 3 лет только 20% от исходного числа доноров продолжают сдавать кровь, требуются большие усилия по привлечению новых доноров. Кроме этого, одно из центральных мест в проблеме донорства занимают отводы от донаций и обеспечение инфекционной безопасности донорской крови и ее компонентов [3, 5–8].

Среди важнейших направлений развития трансфузионной медицины следует считать внедрение биотехнологических разработок, призванных в будущем обеспечить трансфузиологическую службу компонентами крови, полученными *ex vivo* [9]. Работы по получению эритроцитов и тромбоцитов человека из стволовых недифференцированных клеток ведутся в мире уже достаточно давно и уже получены результаты [10–14]. При этом есть данные, что мегакариоцитарные предшественники и мегакариоциты, полученных *ex vivo*, способны к приживлению и образованию тромбоцитов человека у мышей [15, 16]. В этой связи большой интерес вызывает разработка алгоритмов и моделей для использования полученных в условиях *ex vivo* мегакариоцитов, их предшественников и тромбоцитов в клинической практике. В ходе проведенной работы авторами предложен одноэтапный протокол по получению промегакариоцитов человека в условиях *ex vivo* с экспансией первоначальных CD34+гемопоэтических клеток (ГСК) для увеличения общей эффективности процесса.

Материалы и методы. Пуповинная кровь

Пуповинная кровь объемом от 60.8 до 87.9 мл была собрана после подписания

полного информированного согласия роженицами. В исследование были взяты образцы пуповинной крови от женщин, не имеющих семейных случаев тяжелых соматических, онкологических и генетических заболеваний, в т.ч. патологий эритропоэза, лейкопоэза, тромбоцитопоэза и иммунодефицитов. Период гестации 39–40 недель. Все роды были естественными, вес новорожденных 3000–3570 г, количество баллов по шкале Апгар 7–9. Пуповинная кровь была получена путем пункции пупочной вены после отсечения пуповины. Кровь собиралась в гемаконы («Грин Кросс», Южная Корея) с ЦФДА-1 в качестве антикоагулянта, и доставлена в лабораторию при температуре 21°C в течение 8–19 ч.

Выделение лейкоцитарной фракции

Выделение и очистка лейкоцитарной фракции осуществлялись с использованием фиколла (Диаколл/Diacoll, Диа-М, Россия), натрий-фосфатного буфера («Биолот», Россия) согласно следующему протоколу. Гемаконы с пуповинной кровью центрифугировались при 428g, 7 мин для разделения на фракции. После этого проводилось пулирование лейкоцитарного слоя 3–5 единиц пуповинной крови для увеличения общего количества клеток, а также для сглаживания интердонорской вариабельности. Затем осуществлялось его разведение в стерильных условиях в 2 раза натрий-фосфатным буфером. После чего мононуклеарная фракция очищалась на фиколле согласно инструкциям производителя. Анализ клеточных компонентов цельной пуповинной крови и мононуклеарной фракции проводился на гематологическом анализаторе ABX Pentra 60 C+, Франция.

Очистка CD34+ клеток

CD34+ клетки были очищены из выделенной чистой лейкоцитарной фракции с помощью позитивной иммуномагнитной селекции с использованием системы EasySep и (STEMCELL Technologies, Канада) согласно протоколу производителя. CD34+ клетки не подвергались замораживанию и были внесены в среду для культивирования.

Условия культивирования

Культивирование проводилось в 24 луночных планшетах с рабочим объемом 0.8–1 мл при 37°C, 5% CO₂. Клетки вносились в концентрации 2.7–3×10⁴ кл/мл. В среду на основе IMDM было добавлено 20% ВIT 9500 (Gibco, США), 100μМ 5×10⁻² 2-меркаптоэтанол (Helicon, Россия), 1% антибиотика-антимикотика, а также смесь цитокинов ТПО – 30 нг/мл; SCF – 1 нг/мл; ИЛ-6 – 7.5 нг/мл и ИЛ-9 – 13.5 нг/мл (Gibco, США). Культивирование проводилось в течение 13 суток.

Морфологический анализ

Морфологический анализ проводился регулярно при помощи световой микроскопии с использованием систем Zeiss AxioObserver, на ПО AxioVision V 4.6.3.0 и Zeiss AxioStar Plus. Препараты мазков были приготовлены на 3, 5, 7, 10 сутки.

Проточная цитометрия

Анализ клеточной популяции был проведен с помощью проточной цитометрии на цитометре FACS Canto (BD, США) с использованием антител против CD34, CD41a (BD, США). Абсолютный подсчет количества CD34+ клеток был проведен с использованием пробирок Trucount Tubes (BD, США).

Статистическая обработка данных

Обработка данных и построение графиков проводилось с помощью программного обеспечения SigmaPlot version 11.0, Systat Software, Inc., США.

Результаты. Экспансия CD34+

Было отмечено, что уже к 3 суткам общее количество CD34+ клеток увеличилось с 0.668±0.055×10⁶ до 2.411±0.083×10⁶, а к 5 суткам достигло уже 5.453±0.204×10⁶. При этом

экспансия CD34+ была обеспечена на первом этапе однофазного протокола. Динамика увеличения количества CD34+ клеток представлена на рис. 1.

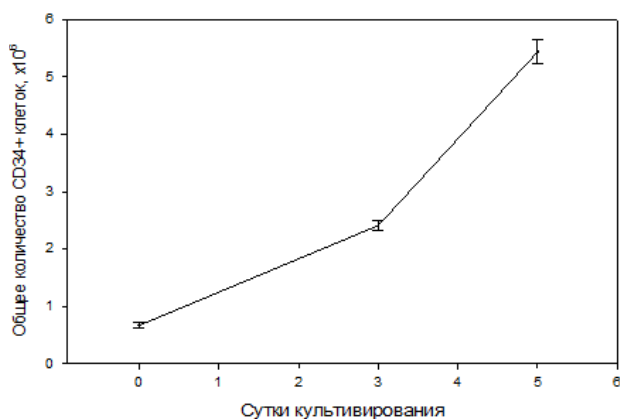


Рис. 1. Изменение количества CD34+ клеток в процессе культивирования

Образование промегакариоцитов

Созревание мегакариоцитов оценивалось по экспрессии маркеров CD34 и CD41a на протяжении культивирования. Было показано, что созревание мегакариоцитов началось уже на 5 сутки культивирования, а наибольшее количество предшественников – промегакариоцитов, экспрессирующих CD34+/CD41a+ наблюдалось на 10 сутки (18.8 ± 1.414% от общей популяции). На диаграммах проточной цитометрии видно выделение отдельной популяции клеток, экспрессирующих CD41a (рис. 2).

К 10 суткам экспрессия CD34-маркера начинала снижаться, что связано с образованием более дифференцированных коммитированных мегакариоцитарных предшественников, чье присутствие было подтверждено с помощью световой микроскопии. Морфо-

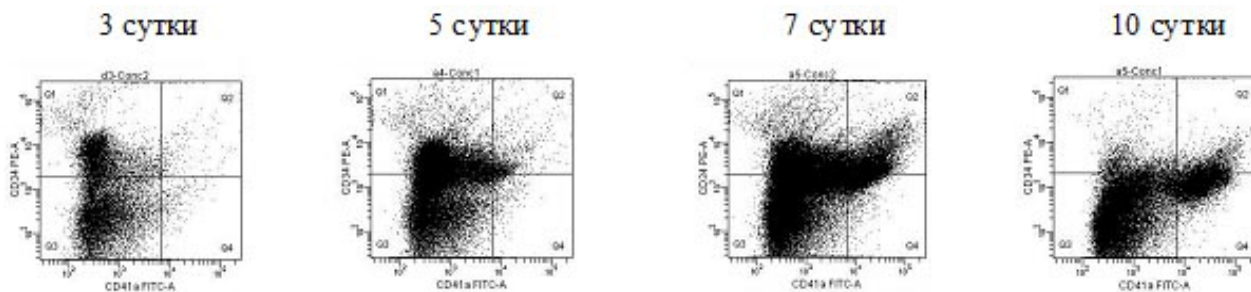


Рис. 2. Диаграммы поточной цитометрии CD34/CD41a с 3 по 10 сутки культивирования

логический анализ показал образование промегакариоцитов диаметром более 20 мкм уже с 7 суток культивирования (рис. 3).

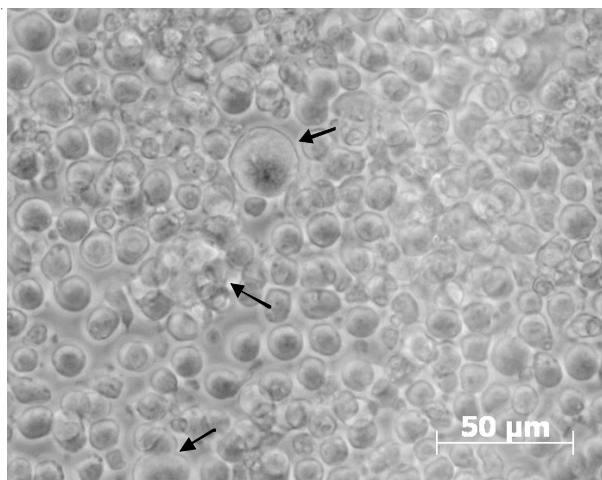


Рис. 3. Промегакариоциты человека в культуре клеток, ув. $\times 200$

Заключение. Было показано, что использование бессывороточной среды с описанным цитокиновым коктейлем позволяет многократно увеличить количество CD34+ клеток в начале культивирования, а также направить их дифференцировку в мегакариоцитарную линию и получить промегакариоциты человека в условиях *ex vivo* из ГСК. Увеличение количества изначальных CD34+ клеток в начале однофазного протокола призвано впоследствии пропорционально увеличить количество мегакариоцитарных предшественников. Полученные таким образом промегакариоциты могут быть заморожены и помещены на хранение, а при необходимости они могут быть использованы для продолженного культивирования для получения сначала мегакариоцитов, а затем тромбоцитов человека. Подобный алгоритм позволит сократить время на получение, очистку и экспансию ГСК из любых источников. В дальнейшем для использования промегакариоцитов из ГСК для получения тромбоцитов человека в условиях *ex vivo* предстоит решить еще много задач не только технического характера (выбор источника ГСК, увеличение их экспансии, подбор оптимальных условий и цитокинов для увеличения эффективности тромбопоэза, синхронизация всех этапов про-

цесса до получения, очистки и использования тромбоцитов), но и законодательного, относительно норм регулирования при использовании клеточных технологий в клинической практике.

Литература

1. Кислякова Л.П. Донорство как компонент национальной безопасности // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: www.science-education.ru/118-14092.
2. Четкин А.В., Данильченко В.В., Григорьян М.Ш., Макеев А.Б., Воробей Л.Г. Деятельность учреждений службы крови Российской Федерации в 2013 году // Трансфузиология. 2014. № 15-3. С. 4–14.
3. Дронов Е.В., Гильмутдинов Р.Г., Захарова И.В., Бегун Д.Н. Характеристика основных проблем развития донорства в России // Фундаментальные исследования. 2014. № 7–4. С. 825–827.
4. Селиванов Е.А., Бессмельцев С.С., Дуткевич И.Г., Данилова И.Г., Лаврова В.А., Четкин А.В., Красняков В.К., Щелкунова Л.В., Дегтерева И.Н., Григорьян М.Ш. Современные проблемы донорства в Российской Федерации // Вестник службы крови России. 2011. № 1. С. 5–14.
5. Четкин А.В., Данильченко В.В., Макеев А.Б., Григорьян М.Ш. Новые технологии обеспечения инфекционной и иммунологической безопасности в учреждениях службы крови Российской Федерации // Трансфузиология. 2014. № 15-1. С. 70–71.
6. Гаврилов А.О., Жуковская Е.В., Спичак И.И., Рудакова Г.А. Биологическая безопасность – один из главных критериев качества трансфузионной помощи // Вестник службы крови России. 2009. № 2. С. 11–17.
7. Зарубин М.В., Жибурт Е.Б. Особенности национального режима донаций крови // Вестник службы крови России. 2014. № 4. С. 27–30.
8. Уйба В. В. Итоги реализации государственной программы развития службы крови России 2014 года // Вестник службы крови России. 2015. № 1. С. 8–12.
9. Хлябич Г.Н., Суханов Ю.С., Лаптев В.В., Персанова Л.В. Служба крови. Время перемен // Вестник службы крови России. 2012. № 2. С. 4–7.
10. Fujimi A., Matsunaga T., Kobune M., Kawano Y., Nagaya T., Tanaka I., Iyama S., Hayashi T., Sato T., Miyanishi K., Sagawa T., Sato Y., Takimoto R., Takayama T., Kato J., Gasa S., Sakai H., Tsuchida E., Ikebuchi K., Hamada H., Niitsu Y. Ex vivo large-scale generation of human red blood cells from cord blood CD34+ cells by co-culturing with macrophages // Int J. Hematol. 2008. V. 87(4). P. 339–50.

11. Reems J.A., Pineault N., Sun S. In vitro megakaryocyte production and platelet biogenesis: state of the art // *Transfus Med Rev.* 2010. V. 24(1). P. 33–43.

12. Noh J.Y., Weiss M.J., Poncz M. Personalized platelet transfusions: one step closer to the clinic // *Cell Stem Cell.* 2014. V. 14(4). P. 425–426.

13. Thon J.N., Mazutis L., Wu S., Sylman J.L., Ehrlicher A., Machlus K.R., Feng Q., Lu S., Lanza R., Neeves K.B., Weitz D.A. Platelet bioreactor-on-a-chip // *Italiano JE Jr. Blood.* 2014. V. 124(12). P. 1857–1867.

14. Hatami J., Andrade P.Z., Alves de Matos A.P., Djokovic D., Lilaia C., Ferreira F.C., Cabral J.M., da Silva C.L. Developing a coculture system for effective megakaryo/thrombopoiesis from umbilical cord blood

hematopoietic stem/progenitor cells // *Cytotherapy.* 2015. V. 17(4). P. 428–442.

15. Bruno S., Gunetti M., Gammaitoni L., Dani A., Cavalloni G., Sanavio F., Fagioli F., Aglietta M., Piacibello W. In vitro and in vivo megakaryocyte differentiation of fresh and *ex-vivo* expanded cord blood cells: rapid and transient megakaryocyte reconstitution // *Haematologica.* 2003. V. 88(4). P. 379–387.

16. Chen T.W., Hwang S.M., Chu I.M., Hsu S.C., Hsieh T.B., Yao C.L. Characterization and transplantation of induced megakaryocytes from hematopoietic stem cells for rapid platelet recovery by a two-step serum-free procedure // *Exp Hematol.* 2009. V. 37(11). P. 1330–1339.

EX VIVO HUMAN PROMEGAKARYOCYTE PRODUCTION

© D.Yu. Klyuchnikov¹, M.Yu. Yazykova¹, L.M. Trusova², S.E. Volchkov², O.V. Tyumina²

¹ Samara State University,

1, ulitsa Akademika Pavlova, 443011, Samara, Russian Federation

² Samara Regional Centre for Family Planning and Reproduction,
159, ulitsa Tashkentskaya, 443095, Samara, Russian Federation

Because of the development of high-technology medicine in the world, there is a growing need for donor blood components, including platelets. In this regard research is now being carried out on the models and protocols for *ex vivo* human megakaryocyte, promegakaryocyte and platelet production from hematopoietic stem cells (HSC) for clinical purpose. Promegakaryocytes derived *ex vivo* can be used to reduce the duration of thrombocytopenia in patients after cord blood transplantation. This paper proposes a one-phase protocol to produce human promegakaryocytes with CD34+ cell expansion. We have succeeded in achieving an increase in the total amount of CD34+ cells from $0.668 \pm 0.055 \times 10^6$ to $5.453 \pm 0.204 \times 10^6$ on the fifth day. The maximum formation of promegakaryocytes (18.8 ± 1.414% of the total number of cells) was observed on the tenth day. The presence of promegakaryocytes was attested using light microscopy.

Key words: cell technologies, stem cells, hematopoietic cells, HSC, promegakaryocytes, megakaryocytes, platelets, *ex vivo*.

**МОЛЕКУЛЯРНО-КЛЕТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ РЕАЛИЗАЦИИ
СТРЕСС-РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА**

© А.В. Дерюгина, А.А. Мартусевич, Т.А. Веселова

Целью работы явился анализ динамики изменений электрокинетических свойств, концентрации продуктов липопероксидации и состояния системы обмена глутатиона в эритроцитах при действии стресс-факторов различной этиологии. Было изучено действие кортизола, а также пчелиного яда и адреналина изолированно и на фоне применения β -блокатора (пропранолола) на электрокинетические свойства и окислительный метаболизм эритроцитов крыс. Показано, что фазное изменение электрофоретической подвижности эритроцитов сопряжено с действием стресс-реализующих компонентов. При этом первичное уменьшение параметра сочетается с ростом концентраций малонового диальдегида и глутатиона при альтерации функций организма. Изменение вектора направленности подвижности эритроцитов происходит на фоне снижения активности перекисного окисления липидов за счет антиоксидантных реакций клетки. Механизм изменений электрокинетических свойств эритроцитов при нарушении баланса про- и антиоксидантных систем может быть опосредован развитием стресс-реакции при действии повреждающих факторов на организм. Учитывая, что активация симпатoadреналовой системы сопровождается усилением образования активных форм кислорода при аутоокислении адреналина, а кортикостероиды вызывают антиоксидантный эффект, можно предположить, что первичный рост концентрации малонового диальдегида в эритроцитах на фоне действия стресс-факторов определяется повышением содержания адреналина в периферической крови, тогда как снижение концентрации метаболита может быть опосредовано действием нарастающей, в ходе развития стресс-реакции, концентрации кортикостероидов. В то же время на фоне повышения активности процессов липопероксидации наблюдается рост содержания глутатиона, что, по всей видимости, связано с активацией компенсаторно-приспособительных реакций в эритроцитах. Показано, что глутатион и глутатион-зависимые ферменты способствуют адаптации к окислительному стрессу. Глутатион-опосредованная детоксикация играет ключевую роль в обеспечении резистентности клеток к повреждающему действию на них продуктов перекисного окисления липидов, свободных радикалов, алкилированию белков. Сохранение высокого уровня глутатиона в эритроцитах связано не только с восстановлением глутатиона, но и с увеличенным его синтезом в клетках.

Ключевые слова: электрокинетическая подвижность эритроцитов, малонового диальдегид, глутатион, липопероксидация.

Ответная реакция организма на любое неблагоприятное воздействие связана со стереотипным комплексом изменений и носит многоуровневый характер, обусловленный развитием стресс-реакции и процессами адаптации организма. Молекулярные механизмы изменений до конца не выяснены, однако многочисленные исследования убеждают в целесообразности рассмотрения общих закономерностей

на клеточном уровне и изучения реорганизации клеточных структур при развитии адаптационного синдрома. В этом плане эритроцитарные мембраны представляют собой удобный объект исследования, поскольку отражают общие закономерности протекания патологических процессов. Электрокинетический потенциал клеток крови, иллюстрирующий их морфофункциональное состояние,

ДЕРЮГИНА Анна Вячеславовна – д.б.н., Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, e-mail: derugina69@yandex.ru

МАРТУСЕВИЧ Анастасия Анатольевна, Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр Минздрава России, e-mail: a_martusevich@mail.ru

ВЕСЕЛОВА Татьяна Анатольевна – к.б.н., Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, e-mail: kfr@bio.unn.ru

может служить индикаторным параметром не только для системы крови, но и для организма в целом. Анализ литературных данных свидетельствует об однообразной реакции электрофоретической подвижности эритроцитов (ЭФПЭ) в виде снижения уровня параметра при различных заболеваниях [1–4]. Проведенное нами исследование закономерностей изменения электрокинетического потенциала эритроцитов при различных экстремальных воздействиях свидетельствует, что показатель является отражением неспецифической реакции организма на раздражитель и связан с развитием стресс-реакции и вовлечением стресс-реализующих систем в ответ на действие раздражителей [5–7]. Установлено, что при действии стрессовых факторов стереотипная реакция организма проявляется интенсификацией процессов свободнорадикального окисления, реализующегося по механизму перекисного окисления липидов (ПОЛ) [8]. Цель работы – анализ динамики электрокинетических свойств, концентрации продуктов липопероксидации и состояния системы глутатиона в эритроцитах при действии стресс-факторов различной этиологии.

Материалы и методы. Исследование проведено на 60 нелинейных белых крысах-самках массой 200–250 г. Крысы были разделены на 6 равных по численности групп ($n = 10$). Для моделирования стресс-реакции 1 группе животных внутрибрюшинно вводили пчелиный яд в дозе 0.1 мг/кг. Крысам 2 группы было произведено внутрибрюшинное введение адреналина в дозе 0.1 мг/кг. Третья группа животных подвергалась инъекциям кортизола в дозе 0.4 мг/кг. Для выяснения роли симпатoadреналовой и гипofизарно-надпочечниковой систем в изменении электрокинетических свойств и окислительного метаболизма эритроцитов было изучено: действие блокатора β -адренорецепторов (пропранолола) в дозе 0.2 мг/кг (4 группа животных) и сочетанного воздействия пропранолола с адреналином в дозе 0.1 мг/кг (5 группа) и пчелиным ядом в дозе 0.1 мг/кг (6 группа). Адреналин и пчелиный яд после инъек-

ции пропранолола вводили спустя 10 мин. Контролем служила группа животных, получавших физиологический раствор внутрибрюшинно. Все инъекции выполнялись однократно.

Забор крови производили из подъязычной вены до и через 15, 60 и 120 мин после воздействия инъекций. Исследовали динамику ЭФПЭ методом микроэлектрофореза (Крылов, Дерюгина, Захарова, Антипенко, 2010), регистрируя время прохождения эритроцитами расстояния 10 мкм в трис-НСl буфере с рН 7.4 при силе тока 10 мА. Интенсивность ПОЛ определяли по содержанию малонового диальдегида (МДА) в эритроцитах (Владимиров, Арчаков, 1972). Для определения концентраций форм глутатиона использовали методику Sedlak, Lindsey, 1968.

Полученные данные были обработаны статистически в программном пакете Statistica 6.1 for Windows. Нормальность распределения значений параметров оценивали с использованием критерия Шапиро – Уилка. С учетом характера распределения признака для оценки статистической значимости различий применяли H -критерий Краскала – Уоллеса.

Результаты исследования. Стрессовая реакция, вызванная введением крысам пчелиного яда, приводила к появлению типичной двухфазной реакции ЭФПЭ, выявленной нами ранее [8]. Учитывая, что при стрессе ведущими нейро-гормональными системами являются симпатoadреналовая и гипоталамо-гипofизарно-надпочечниковая, можно полагать, что на клеточном уровне реализуется последовательное включение процессов, обусловленное действием изменяющихся концентраций катехоламинов и кортикостероидов в периферической крови [9]. Показано, что введение адреналина в организм вызывало снижение ЭФПЭ на протяжении 120 мин эксперимента, составив 74% от уровня значений контрольной группы ($p \leq 0.05$) (табл. 1). Напротив, введение кортизола определило рост ЭФПЭ во всех точках наблюдения: к 15 мин до 110% от контрольных значений с максимальным увеличением показателя к 60 мин эксперимента до 146% от зна-

Динамика изменения электрофоретической подвижности эритроцитов (мкм·см/В·с) при различных видах воздействия на крыс

Вид воздействия	Время после воздействия, мин			
	15	30	60	120
Пчелиный яд (0.5мг/кг)	1.08±0.03*	1.11±0.03*	1.24±0.02*	1.48±0.03*
Адреналин	1.02±0.09*	1.05±0.06*	0.99±0.08*	0.92±0.08*
Кортизол	1.28±0.08*	1.49±0.05*	1.73±0.05*	1.67±0.09*
Физ. раствор	1.17±0.02	1.19±0.02	1.19±0.02	1.23±0.04
β-адреноблокатор	1.15±0.06	1.24±0.07	1.31±0.07*	1.37±0.04*
β-адреноблокатор + пчелиный яд	1.22±0.03	1.35±0.03*	1.42±0.08*	1.75±0.04*
β-адреноблокатор + адреналин	1.06±0.06	1.13±0.05	1.22±0.08	1.27±0.05
Интактные	1.21 ± 0.05	1.24 ± 0.08	1.21 ± 0.05	1.26 ± 0.03

Примечание: * – статистически значимые различия ($p < 0.05$) с животными, получавшими внутрибрюшинно физиологический раствор.

чений контроля ($p \leq 0.05$). Введение адреналина и пчелиного яда на фоне β-блокатора снижало или полностью отменяло реакцию снижения ЭФПЭ, но не изменяло фазу повышения ЭФПЭ в ответ на введение пчелиного яда.

Результаты исследований свидетельствуют, что регистрируемое изменение ЭФПЭ при стрессовых воздействиях связано с повышением уровня циркулирующих катехоламинов и глюкокортикоидов в крови и (или) повышением чувствительности к ним рецепторов клеток. При этом механизм ответной реакции клетки может реализоваться через

изменение морфофункционального состояния ее мембраны.

Наиболее общим показателем, характеризующим функциональное состояние мембран, в том числе активность ПОЛ, является концентрация МДА [10]. Установлено, что через 15–30 мин после действия пчелиного яда и адреналина в эритроцитах содержание МДА увеличивалось (табл. 2). Наиболее значимые увеличения концентрации регистрировались при применении адреналина. Действие пчелиного яда, после роста концентрации МДА к 15 мин относительно контрольной группы, определило отсроченное снижение уровня

Т а б л и ц а 2

Изменение концентрации малонового диальдегида в эритроцитах (нМоль/мл) при различных видах воздействия на крыс

Вид воздействия	Время после воздействия, мин			
	15	30	60	120
Пчелиный яд	4.01±0.18*	3.66±0.14*	2.98±0.12 *	2.61±0.13*
Адреналин	4.25±0.16*	5.73±0.12 *	5.18±0.10 *	4.79±0.17*
Кортизол	2.76±0.26*	2.93±0.34*	2.41±0.32 *	2.81±0.16*
Физ. раствор	3.54±0.18	4.02±0.14	3.72±0.16	3.30±0.14
β-адреноблокатор	3.36±0.20	4.18±0.26	3.98±0.24	3.57±0.28
β-адреноблокатор + пчелиный яд	3.89±0.22	4.49±0.28	3.79±0.30	3.56±0.26
β-адреноблокатор + адреналин	4.04±0.32	4.34±0.26	4.28±0.24	3.82±0.20*
Интактные	3.14 ± 0.23	3.52±0.40	2.99±0.43	2.77± 0.39

Примечание: * – статистически значимые различия ($p < 0.05$) с животными, получавшими физиологический раствор.

МДА после 30 мин эксперимента. Исследование концентрации МДА при действии кортизола выявило снижение его концентрации относительно контроля во всех точках наблюдения ($p < 0.05$). На фоне блокады β -адренорецепторов пропранололом выявлено ослабление эффектов, связанных с действием адреналина.

Результаты показали, что первоначальное снижение ЭФПЭ сочеталось с активацией процессов ПОЛ при действии стресс-фактора, тогда как рост уровня ЭФПЭ сопровождался уменьшением концентрации МДА. Наибольшее увеличение концентрации МДА вызывало наибольшее уменьшение ЭФПЭ и проявление выраженности 1-й фазы изменения ЭФПЭ (для адреналовой токсемии). Уменьшение интенсивности ПОЛ сопровождалось увеличением подвижности и развитием 2-й фазы ЭФПЭ – ростом (при действии пчелиного яда).

Ответной реакцией, направленной на предотвращение повреждающего действия продуктов окисления, служит усиление антиоксидантной защиты [11]. Было проведено исследование обмена глутатиона, являющегося буфером, нейтрализующим перекиси липидов [12]. Исследование концентрации общего глутатиона позволило установить нарастание его уровня в эксперименте при всех воздействиях (табл. 3). При введении адреналина и пчелиного яда отклонения от нормы общего глутатиона в эритроцитах отме-

чались в ранние сроки и сохранялись на неизменно высоком уровне во всех точках наблюдения ($p \leq 0.05$). Анализ глутатиона на фоне блокады β -адренорецепторов свидетельствовал о снижении эффектов адреналина и пчелиного яда на фоне пропранолола, что выражалось в снижении или отмене роста концентраций всех фракций глутатиона. Введение кортизола определило увеличение общего глутатиона и его восстановленной формы на 15 мин эксперимента с последующим восстановлением к значениям контрольной группы животных.

Таким образом, в ходе эксперимента выявлено, что при моделировании острого стресса исследуемые воздействия вызывали первоначальное падение ЭФПЭ и рост как общего глутатиона, так и восстановленной его формы. Дальнейшее изменение вектора направленности (рост ЭФПЭ) не было сопряжено с изменением направленности в состоянии системы глутатиона. Однако при действии стресс-факторов, для которых была характерна выраженность первой фазы стресса, проявляющаяся в уменьшении ЭФПЭ, выявлено также нарастание уровня окисленной формы глутатиона. Тогда как при воздействиях, вызывающих наиболее выраженное проявление второй фазы ЭФПЭ (ее рост), было характерно интенсивное увеличение концентрации общего глутатиона и его восстановленной формы.

Т а б л и ц а 3

Динамика изменения концентрации общего глутатиона в эритроцитах (мг%) при различных видах воздействия на крыс

Вид воздействия	Время после воздействия, мин			
	15	30	60	120
Пчелиный яд	141.7±4.8 *	181.4±4.6*	166.8±5.0*	179.7±5.8*
Адреналин	166.7±5.2 *	211.6±5.7 *	193.5±5.6 *	208.6±5.2 *
Кортизол	124.4±4.8*	135.4±5.2	123.2±8.2	124.9±5.9
Физ. раствор	109.7±5.1	126.2±7.6	120.9±7.6	138.2±6.7
β -адреноблокатор	127.1±5.7*	144.8±4.2 *	120.2±3.4	124.5±6.6
β -адреноблокатор + пчелиный яд	129.4±6.3*	143.7±7.8	113.3±5.2	131.2±6.8
β -адреноблокатор + адреналин	133.5±7.2*	163.9±7.6*	162.2±5.4*	182.4±8.3*

Примечание: * – статистически значимые различия ($p < 0.05$) с животными, получавшими физиологический раствор.

Обсуждение результатов. Таким образом, регистрируемое в опытах фазное изменение ЭФПЭ сопряжено с действием стресс-реализующих компонентов. При этом первичное уменьшение ЭФПЭ сочетается с ростом концентраций МДА и глутатиона при альтерации функций организма. Изменение вектора направленности ЭФПЭ происходит на фоне снижения активности ПОЛ за счет действия антиоксидантных реакций клетки. Механизм реализации изменения ЭФПЭ при нарушении баланса про- и антиоксидантных систем эритроцитов может быть опосредован развитием стресс-реакции при действии повреждающих факторов на организм. Учитывая, что активация симпатoadреналовой системы сопровождается усилением образования активных форм кислорода при аутоокислении адреналина [13], а кортикостероиды вызывают антиоксидантный эффект [14], можно предположить, что первичный рост концентрации МДА в эритроцитах на фоне действия стресс-факторов определяется повышением содержания адреналина в периферической крови, тогда как снижение концентрации МДА может быть опосредовано действием нарастающей, в ходе развития стресс-реакции, концентрации кортикостероидов. В то же время на фоне повышения активности ПОЛ наблюдается рост содержания глутатиона, что, по всей видимости, связано с активацией компенсаторно-приспособительных реакций в эритроцитах. Показано, что глутатион и глутатионзависимые ферменты способствуют адаптации к окислительному стрессу [15, 16]. Глутатионопосредованная детоксикация играет ключевую роль в обеспечении резистентности клеток к цитоповреждающему действию продуктов ПОЛ, свободных радикалов, алкилированию белков [17]. Сохранение высокого уровня глутатиона в эритроцитах связано не только с восстановлением глутатиона, но и с увеличенным синтезом GSH в клетках. Так, в ответ на действие стрессовых факторов развиваются метаболические перестройки, направленные как на усиление синтеза, так и восстановление окисленной формы глутатиона.

Литература

1. Бирюкова Л.С., Пурло Н.В., Козинец Г.И. Морфофункциональные свойства эритроцитов у больных в терминальной стадии хронической почечной недостаточности, получающих заместительное лечение программным гемодиализом и эритропоэтином // Нефрология и диализ. 2003. Т. 5, № 1. С. 43–49
2. Матюшичев В.Б., Шамратова В.Г. Изменение электрофоретической подвижности эритроцитов при онкопатологии // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 5. С. 1093–1096.
3. Dobrzynska I., Szachowicz-Petelska B., Skrzydlewska E., Figaszewski Z.A. Protective effect of green tea on electric properties of rat erythrocytes membrane during ethanol intoxication // J. of Environmental Biology. 2006. V. 27, № 2. P. 161–166.
4. Veshapidze N., Chigogidze T., Managadze L., Gabunia N., Kotrikadze N. Dynamics of the structural and electrical characteristics of erythrocytes in men with metastatic adenocarcinoma of the prostate before and after plastic orchectomy // Georgian medical news. 2007. № 12. P. 11–14.
5. Крылов В.Н., Дерюгина А.В., Антипенко Е.А. Электрофоретическая подвижность эритроцитов как способ оценки функции коры надпочечников при стрессе и патологических состояниях организма // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2013. № 9(2). С. 39–42.
6. Крылов В.Н., Дерюгина А.В., Константинова А.И. Электрофоретическая подвижность и активность Na, K-АТФазы эритроцитов у крыс при стрессе // Росс. физиол. журнал им. И.М. Сеченова. 2014. Т. 100, № 11. С. 1297–1302.
7. Крылов В.Н., Дерюгина А.В., Гришина А.А. Изменение электрофоретической подвижности эритроцитов и липидного спектра их мембран при различных стрессовых воздействиях // Гематология и трансфузиология. 2010. № 3. С. 40–44.
8. Крылов В.Н., Дерюгина А.В. Изменение электрофоретической подвижности изолированных эритроцитов при действии стресс-факторов // Гематология и трансфузиология. 2011. Т. 56, № 5. С. 18–21.
9. Владимиров Ю.А. Свободные радикалы и антиоксиданты // Вестник РАМН. 1998. № 7. С. 43–51.
10. Matteucci E., Cocci F., Pellegrini L. Erythrocyte ATP-ase enzymes family in normal people // Eur. J. Clin. Invest. 1992. № 4. P. 11.
11. Журавлев А.И., Зубкова С.М. Антиоксиданты. Свободнорадикальная патология. М.: МГАВМ и Б им. К.И. Скрябина, 2008. 272 с.
12. Stocker R., Frei B. Endogenous antioxidant defences in human blood plasma // Sies H. Oxidative stress: oxidants and antioxidants. London: Academic Press. 1991. P. 213–243.

13. Бизенкова М.Н., Романцева М.Г., Чеснокова Н.П. Метаболические эффекты антиоксидантов в условиях острой гипоксической гипоксии // *Фундаментальные исследования*. 2006. № 1. С. 17–21.

14. Сергеев П.В. Стероидные гормоны. М.: Наука, 1984. 240 с.

15. Кудряшов А.М., Титова Н.М., Кудряшова Е.В. Влияние поллютантов с различными стресс-характеристиками на антиоксидантный статус эритроцитов *in vitro* // *Экология человека*. 2005. № 1. С. 14–18.

16. Mantovani G., Maccio A., Madeddi C. Reactive oxygen species, antioxidant mechanisms and serum cytokine levels in cancer patients: impact of an antioxidant treatment // *J. Cell. Mol. Med.* 2002. V. 6, № 6. P. 570–582.

17. Желенина Л.А., Иващенко Т.Э., Ефимова Н.С. Полиморфизм генов семейства глутатион-S-трансферазы (GST) при бронхиальной астме у детей // *Аллергология*. 2003. № 2. С. 43–46.

MOLECULAR AND CELLULAR MECHANISMS OF STRESS RESPONSE REALIZATION IN THE ORGANISM

© A.V. Deryugina¹, A.A. Martusevich², T.A. Veselova¹

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
23, prospekt Gagarina, 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation

²The Volga Federal Medical Research Centre, Ministry of Health of the Russian Federation,
18, Verkhne-Volzhsкая naberezhnaya, 603155, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The aim of this paper is to analyze the changes occurring in the dynamics of electrokinetic properties, level of lipid peroxides and condition of glutathione system in erythrocytes under the influence of different stress factors. We have investigated the effect of cortisol, as well as bee venom and adrenaline both in isolated and combined β -blocker (propranolol) forms on the electrokinetic properties and oxidative metabolism of rat erythrocytes. It is shown that the phase change of electrophoretic mobility of red blood cells involves the action of stress-realizing components. The initial reduction of the parameter is combined with an increase in the concentrations of malonic dialdehyde and glutathione at altering body functions. The change in the vector direction of the mobility of erythrocytes occurs together with the reduced activity of lipid peroxidation due to antioxidant reactions of the cell. The mechanism of the changes occurring in the electrokinetic properties of erythrocytes under the imbalance of pro- and antioxidant systems may be mediated by stress reaction development. Given that activation of sympathoadrenal system is accompanied by more intensive formation of reactive oxygen species under adrenaline self-oxidation, and corticosteroids cause the antioxidant effect, it can be assumed that the initial increase in the concentration of malonic dialdehyde in erythrocytes via the action of stress factors is dictated by an increase in the adrenaline level in the peripheral blood, whereas the decrease in metabolite concentrations may indirectly depend on growing concentrations of corticosteroids during the stress reaction development. At the same time, we have observed the increase in the glutathione level parallel to that in the lipid peroxidation associated, in all probability, with the activation of compensatory adaptive reactions in erythrocytes. It is shown that glutathione and glutathione-dependent enzymes encourage the adaptation to oxidative stress. Glutathione-mediated detoxification plays a key role in ensuring the resistance of cells to the damaging action of lipid peroxides, free radicals and alkylated proteins. The high-level glutathione concentration in erythrocytes is associated not only with the restoration of glutathione, but also with its increased synthesis in cells.

Key words: electrokinetic mobility of erythrocytes, malonic dialdehyde, glutathione, lipid peroxidation.

УДК 577.471:612.1

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО КУРСА ИНГАЛЯЦИЙ ОКСИДА АЗОТА
НА КРИСТАЛЛОГЕННЫЕ СВОЙСТВА СЫВОРОТКИ КРОВИ КРЫС**

© А.К. Мартусевич, Л.К. Ковалева, А.А. Мартусевич, С.П. Перетягин, В.И. Карелин

Целью работы явилось изучение особенностей модификации кристаллогенных свойств сыворотки крови крыс при субхроническом воздействии ингаляций оксида азота. Эксперимент выполнен на 40 половозрелых крысах-самцах линии Вистар, разделенных на 4 равные по численности группы. Контрольная группа ($n=10$) включала животных, которым не производили никаких воздействий, кроме однократного получения образцов крови. Крысы основных (второй, третьей и четвертой) групп получали ежедневные ингаляции оксида азота в концентрации 20, 50 и 100 ppm соответственно на протяжении 30 дней. У животных основных групп забирали образцы крови из подъязычной вены сразу после завершения полного курса ингаляций (на 30-е сутки эксперимента) и в отдаленном периоде (на 60-е сутки эксперимента). Изучали кристаллогенную активность сыворотки крови животных. Основными визуаметрическими показателями, оцениваемыми в балльной шкале, служили кристаллизуемость, индекс структурности, степень деструкции фации и выраженность краевой зоны микропрепарата. Полученные данные были обработаны статистически в программном пакете Statistica 6.1 for Windows. Установлено, что проведение длительного курса ингаляций оксида азота (30 ежедневных процедур) обеспечивает модуляцию кристаллогенных свойств сыворотки крови, причем наиболее физиологичный ответ на воздействие имеет место при использовании минимальной концентрации агента (20 ppm). В этом случае наблюдали минимальное отклонение кристаллоскопической картины от характерной для интактных животных и полноценное ее восстановление через 1 месяц после завершения курса. Напротив, применение более высоких доз NO не только приводит к существенному сдвигу кристаллогенной активности биожидкости сразу по завершении воздействия, но и затрудняет протекание восстановительных процессов. Следует отметить, что данная модификация касается как кристаллической части картины, так и структуры краевой белковой ее зоны.

Ключевые слова: оксид азота, хроническая токсичность, кристаллогенные свойства, кровь.

На протяжении последних трех десятилетий не угасает интерес исследователей и практикующих врачей к применению различных методов биорадикальной терапии, к которой следует отнести озонотерапию и NO-терапию [1–3]. При этом особенности химической активности оксида азота [3, 4] и от-

сутствие других обоснованных методов его системного введения обусловили широкое использование ингаляций соединения с лечебной целью при респираторном дистресс-синдроме, легочной гипертензии и иной патологии у взрослых пациентов и детей [5–8]. В то же время токсикологические аспекты

МАРТУСЕВИЧ Андрей Кимович – д.б.н., Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр, e-mail: cryst-mart@yandex.ru

КОВАЛЕВА Лида Константиновна – к.б.н., Кировская государственная медицинская академия, e-mail: mzil43@mail.ru

МАРТУСЕВИЧ Анастасия Анатольевна, Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр, e-mail: a_martusewich@mail.ru

ПЕРЕТЯГИН Сергей Петрович – д.м.н., Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр, e-mail: psp-aro@mail.ru

КАРЕЛИН Владимир Иванович – д.ф.-м.н., Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, e-mail: karelin@ntc.vniief.ru

данной медицинской технологии практически не раскрыты.

В предшествующих работах нами было показано, что влияние NO на различные физико-химические параметры изолированной крови человека *in vitro*, в том числе окислительный и энергетический метаболизм, состояние систем ферментной детоксикации, носит дозозависимый характер, а также определяется формой введения агента (свободной газообразной или депонированной) [9, 10]. Это в полной мере относится к одному из интегральных индикаторов компонентного состава и свойств биологических жидкостей – их кристаллогенным свойствам [11]. Установлено, что низкие дозы соединения, находящегося в свободном либо депонированном состоянии (в форме динитрозильных комплексов железа с тиол-содержащими лигандами), способствуют умеренному усилению структуризации сыворотки крови [12], тогда как высокие концентрации свободного NO выражено угнетают ее [11], что сопровождается и другими негативными метаболическими сдвигами [9, 10]. Показано, что в последнем случае образующиеся кристаллические элементы имеют признаки значительной деструкции, а в краевой зоне обнаруживается новая полоса, генез которой потенциально связан с нарастанием концентрации 3-нитротирозина – известного маркера нитрозативного стресса [13] – в плазме крови [11]. С учетом этого предполагается, что кристаллогенная активность биологического субстрата способна выступать в качестве индикатора токсических изменений в ней. Это подтверждают и данные других исследователей [14].

На основании вышеперечисленного целью работы явилось изучение особенностей модификации кристаллогенных свойств сыворотки крови крыс при субхроническом воздействии ингаляций оксида азота.

Материал и методы. Эксперимент выполнен на 40 половозрелых крысах-самцах линии Вистар, разделенных на 4 равные по численности группы. Контрольная группа ($n=10$) включала животных, которым не про-

изводили никаких воздействий, кроме однократного получения образцов крови. Крысы основных (второй, третьей и четвертой) групп получали ежедневные ингаляции оксида азота в концентрации 20, 50 и 100 ppm соответственно на протяжении 30 дней. Продолжительность одной процедуры составляла 10 мин, скорость газового потока – 2 л/мин. Для проведения ингаляций животных (по одному) помещали в эксикатор, в котором производили подачу и отведение газовой смеси. Синтез NO-содержащей воздушной смеси осуществляли с помощью экспериментального генератора, разработанного в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) [15].

У животных основных групп забирали образцы крови из подъязычной вены сразу после завершения полного курса ингаляций (на 30-е сутки эксперимента) и в отдаленном периоде (на 60-е сутки эксперимента). Для получения сыворотки крови производили центрифугирование всех образцов при 1500 об/мин в течение 15 мин. Затем сыворотку крови в объеме 100 мкл наносили на предметное стекло и приготавливали микропрепараты высушенной биологической жидкости в соответствии с методом кристаллоскопии, позволяющим оценивать собственную кристаллогенную активность биосреды [11, 12]. Высушенные микропрепараты оценивали морфологически (путем описания особенностей структуризации высушенного образца биологической жидкости) и визуаметрически (с применением собственной системы параметров) [11, 12]. Основными визуаметрическими показателями, оцениваемыми в балльной шкале, служили кристаллизуемость (отражает количественную сторону кристаллизации – плотность кристаллических элементов в фации), индекс структурности (характеризует сложность структуропостроения), степень деструкции фации (представляет собой индикатор качественной стороны процесса – правильности образования структур) и выраженность краевой зоны микропрепарата.

Полученные данные были обработаны статистически в программном пакете Statistica

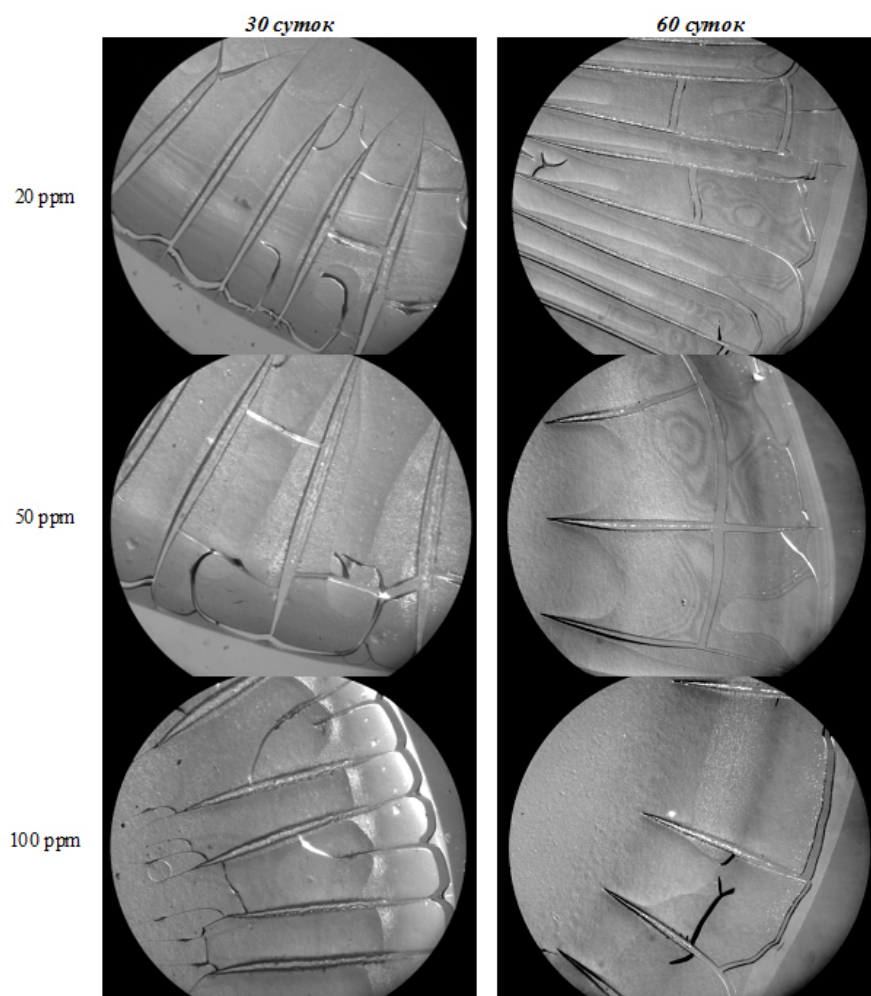


Рис. 1. Кристаллоскопическая картина сыворотки крови крыс в динамике ингаляций NO

6.1 for Windows. Нормальность распределения значений параметров оценивали с использованием критерия Шапиро – Уилка. С учетом характера распределения признака для оценки статистической значимости различий применяли Н-критерий Краскала – Уоллеса.

Результаты и обсуждение. Проведенные исследования позволили установить, что характер действия длительного курса ингаляций оксида азота существенно зависит от дозы воздействующего агента. Следует отметить, что во всех случаях были применены относительно низкие концентрации NO (20, 50 или 100 ppm), для которых в предшествующих экспериментах *in vitro* были продемонстрированы позитивные эффекты как в абсолютных значениях, так и по сравнению с высокими дозами соеди-

нения (800 ppm) [11]. Несмотря на это, имела место дозозависимость отслеживаемого влияния. Так, сразу после завершения тридцатидневного курса ингаляций наиболее низкой из использованных концентраций NO (20 ppm) кристаллоскопическая картина высушенного образца сыворотки крови крыс включала в центральной зоне немногочисленные одиночно-кристаллические элементы с минимальными признаками деструкции, а в краевой – регулярные центростремительные разломы (рис. 1). Подобный характер дегидратационной структуризации практически полностью соответствовал картине, наблюдаемой у животных контрольной группы. Единственной особенностью кристаллограмм биожидкости крыс, получивших курс ингаляций 20 ppm

NO, служило формирование небольшого количества дополнительных коротких разнонаправленных разломов, вариабельно присутствующих по всей текстуре образца.

Увеличение действующей концентрации соединения до 50 ppm приводило по завершении курса процедур к умеренному повышению кристаллизруемости в центральной зоне фации, а также способствовало незначительной хаотизации структуры разломов краевой зоны. Это косвенно свидетельствует об изменении белкового профиля сыворотки крови животных при рассматриваемом воздействии.

Наиболее высокая среди примененных концентрация оксида азота (100 ppm) обеспечивала более глубокие преобразования дегидратационной структуризации биологической

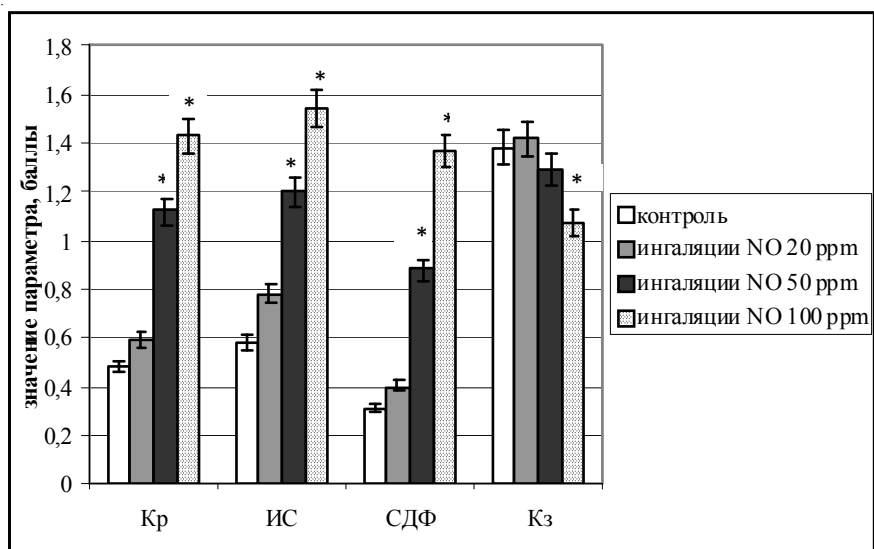


Рис. 2. Результат параметрической оценки кристаллоскопических фаций сыворотки крови крыс после завершения курса ингаляций оксида азота (30-й день эксперимента; * – статистическая значимость различий относительно уровня контрольной группы $p < 0.05$; Кр – кристаллизуемость, ИС – индекс структурности, СДФ – степень деструкции фации, Кз – выраженность краевой зоны фации)

жидкости. В частности, в центральной зоне образца наблюдали значительное повышение кристаллизуемости с появлением единичных дендритных кристаллов в центральной зоне. В краевой зоне при сохранении регулярности и плотности разломов отмечали их активное ветвление и распространение на промежуточную зону кристаллоскопической фации. Кроме того, регистрировали отграничение наиболее удаленной от центра части от остального высушенного образца с формированием специфического «краевого пояса». Эти изменения указывают на наличие существенного белкового дисбаланса в изучаемой биологической жидкости.

Указанные сдвиги кристаллогенной активности сыворотки крови крыс, возникающие после проведения курса ингаляций NO, подтверждаются и результатами параметрической оценки фаций (рис. 2). Так, по количественному показателю активности структуризации – кристаллизуемости – у животных, получавших оксид азота в наименьшей концентрации (20 ppm) не обнаруживали значимых различий с интактными крысами. Применение более высоких концентраций соединения демонстрирует отчетливую тенденцию к до-

зозависимому увеличению кристаллизуемости, причем уже ингаляции 50 ppm NO, как и максимальная из его использованных доз (100 ppm), обеспечивают пропорциональное нарастание уровня показателя ($p < 0.05$ для обоих случаев). Аналогичные тенденции имели место для индекса структурности, отображающего сложность построения образуемых кристаллических элементов высушенного образца, а также степени деструкции фации. Последняя достигает уровня умеренной деструкции по завершении курса ингаляций 50 ppm оксида азота,

тогда как при длительном действии соединения в концентрации 100 ppm наблюдали более выраженное увеличение параметра ($p < 0.05$ для обоих случаев).

Сформированность краевой зоны фации оказалась показателем, наименее чувствительным к рассматриваемому воздействию (см. рис. 2). Так, сразу по завершении курса ингаляций не регистрировали значимых отклонений по данному параметру при использовании 20 и 50 ppm NO. В то же время наиболее высокая концентрация оксида азота уменьшает выраженность краевой белковой зоны, что потенциально связано со увеличением фракции нитрозилированных белков плазмы.

Вторым компонентом анализа явилась оценка степени и скорости восстановления кристаллогенной активности изучаемой биосреды, для чего выбрана вторая контрольная точка – через 30 дней после завершения курса ингаляций. Установлено, что в этот период морфология высушенных образцов сыворотки крови животных, получавших газовую смесь с концентрацией оксида азота 20 ppm, полностью соответствовала характерной для здоровых крыс (см. рис. 1). Напротив, более

высокие дозы соединения не приводили к полноценному восстановлению кристаллоскопической картины биологической жидкости. В частности, при применении 50 ppm NO крайняя зона фации уменьшалась, в ней происходила нормализация структуры разломов, но наблюдались выраженные неоднородности текстуры. При этом сохранялась повышенная кристаллогенная активность биосреды.

Наиболее неблагоприятной была картина кристаллизации сыворотки крови крыс, которым проводили ингаляции оксида азота в концентрации 100 ppm (см. рис. 1). В фациях биожидкости этих животных отмечали формирование радиальных, нерегулярных разломов, причем сама крайняя зона «размыта», включает несколько полос. Это свидетельствует о гетерогенности белкового профиля биосреды и, потенциально, о модификации белков в условиях NO-воздействия.

Приведенные тенденции полностью подтверждаются результатами параметрического описания фаций сыворотки крови (рис. 3). Выявлено, что на 60-й день эксперимента, характеризующий восстановительный период, ни один из показателей не отличался значительно от уровня интактных животных. С другой стороны, повышение концентрации соединения до 50 или 100 ppm способствует сохранению всех изучаемых параметров на повышенных цифрах по сравнению с крысами, не подвергавшимися воздействию оксида азота ($p < 0.05$), причем выраженность отклонений отчетливо дозозависима.

Заключение. Установлено, что проведение длительного курса ингаляций оксида азота обеспечивает модуляцию кристаллогенных свойств сыворотки крови, причем наиболее

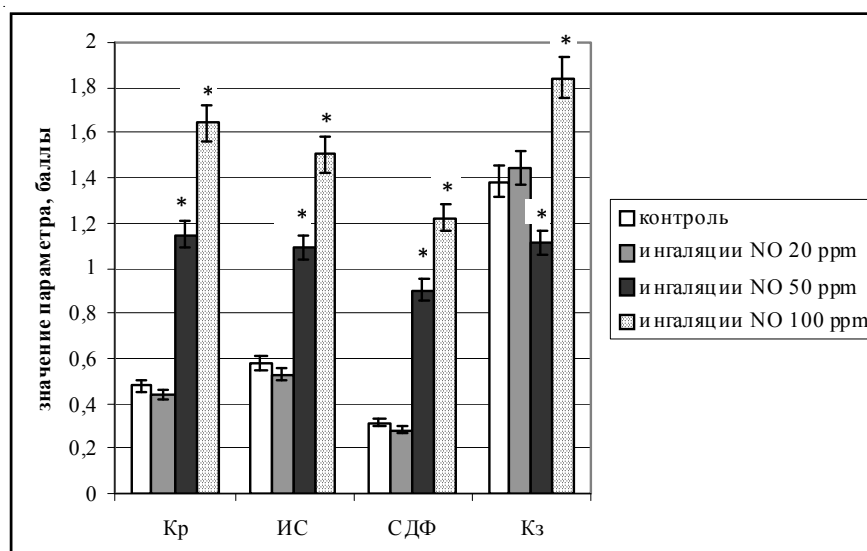


Рис. 3. Результат параметрической оценки кристаллоскопических фаций сыворотки крови крыс в восстановительном периоде после завершения курса ингаляций оксида азота (60-й день эксперимента; обозначения – аналогично рис. 2)

физиологичный ответ на воздействие имеет место при использовании минимальной концентрации агента (20 ppm). В этом случае наблюдали минимальное отклонение кристаллоскопической картины от характерной для интактных животных и полноценное ее восстановление через 1 месяц после завершения курса. Напротив, применение более высоких доз NO не только приводит к существенному сдвигу кристаллогенной активности биожидкости сразу по завершении воздействия, но и затрудняет протекание восстановительных процессов. Следует отметить, что данная модификация касается как кристаллической части картины, так и структуры краевой белковой ее зоны.

Исследование проведено в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых-докторов наук (грант МД-7256.2015.7).

Литература

1. Перетягин С.П., Стручков А.А., Мартусевич А.К. с соавт. Применение озона как средства детоксикации в раннем периоде ожоговой болезни // Скорая медицинская помощь. 2011. Т. 12, № 3. С. 39–43.

2. Костюк В. А., Потапович А. И. Биорадикалы и биоантиоксиданты. Минск, 2004.
3. Nitric Oxide. Basic Research and Clinical Application / Ed. R.J. Gryglewsky, P. Minuz. Amsterdam; Berlin; Oxford; Tokyo; Washington: IOS Press, DC, 2001.
4. Граник В.Г., Григорьев Н.Б. Оксид азота (NO). Новый путь к поиску лекарств. М.: Вузовская книга, 2004. 360 с.
5. Kincella J.P. Early inhaled nitric oxide therapy in premature newborns with respiratory failure // *New England J.* 2006. V. 355. P. 354–364.
6. Kumar P. et al. Use of inhaled nitric oxide in preterm infants // *Pediatrics.* 2014. T. 133, № 1. С. 164–170.
7. Mathisen D.J., Kuo E.Y., Hahn C. et al. Inhaled nitric oxide for adult respiratory distress syndrome after pulmonary resection // *Ann. Thor. Surg.* 1998. V. 66. P. 1894–1902.
8. Ricciardi M.J., Knight B.P., Martinez F.J., Rubenfire M. Inhaled nitric oxide in primary hypertension: A safe and effective agent for predicting response to nifedipine // *J. of the American College of Cardiology.* 1998. V. 32. P. 1068–1073.
9. Мартусевич А.К., Перетягин С.П., Соловьева А.Г., Ванин А.Ф. Оценка некоторых молекулярных эффектов газообразного оксида азота на кровь человека *in vitro* // *Биофизика.* 2013. Т. 58, № 5. С. 871–875.
10. Мартусевич А.К., Соловьева А.Г., Перетягин С.П. Влияние свободного и депонированного оксида азота на энергетический метаболизм крови // *Современные технологии в медицине.* 2013. Т. 5, № 4. С. 33–38.
11. Мартусевич А.К., Перетягин С.П. Модификация дегидратационной структуризации сыворотки крови при ее обработке оксидом азота // *Биофизика.* 2013. Т. 58, № 6. С. 1038–1042.
12. Ашихмин С.П., Мартусевич А.К. Особенности дегидратации сыворотки крови при действии свободного и депонированного оксида азота *in vitro* // *Врач-аспирант.* 2014. № 6. С. 30–34.
13. van der Vliet A. et al. Formation of reactive nitrogen species during peroxidase-catalyzed oxidation of nitrite. A potential additional mechanism of nitric oxide-dependent toxicity // *J. Biol. Chem.* 1997. Vol. 272. P. 7617–7625.
14. Ющенко А.А. Даудова А.Д., Аюпова А.К., Урляпова Н.Г. Использование морфоструктурной реакции сыворотки крови в токсикологической оценке лекарственных средств // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* 2004. № 7. С. 113–117.
15. Карелин В.И., Буранов С.Н., Пименов О.А. и др. Плазмохимическая установка для NO-терапии // *Медиаль.* 2013. № 4. С. 46.

INFLUENCE OF LONG-TERM COURSE OF NITRIC OXIDE INHALATIONS ON CRYSTALLOGENIC PROPERTIES OF RAT BLOOD SERUM

© А.К. Martusevich^{1,2}, Л.К. Kovaleva³, А.А. Martusevich¹, С.П. Peretyagin^{1,2}, В.И. Karelin⁴

¹The Volga Federal Medical Research Centre, Ministry of Health of the Russian Federation

²Russian Association of Ozone Therapists

³Kirov State Medical Academy, Ministry of Health of the Russian Federation

⁴Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

The aim of this paper is to study the modification of blood serum crystallization in rats under subchronic exposure to nitric oxide. The experiments were performed on 40 Wistar mature male rats divided into 4 equal groups. The control group ($n=10$) included animals without any manipulations, except for a one-time blood sampling. The rats of the second, third and fourth groups inhaled 20, 50 and 100 ppm nitric oxide, respectively, for 30 days. Blood samples from the sublingual vein of the animals in these groups were taken after the full course of inhalations (on the 30th day of the experiment) and after the recovery period (on the 60th day of the experiment). Crystallogenic properties of blood serum were studied both morphologically and parametrically. Major visiometric indices were estimated by point scale and included crystallizability, structuration, the degree of facies destruction and expression of the marginal zone in microsamples. The data obtained in the experiments were statistically processed using the software package Statistica 6.1 for Windows. It was found that a long-term course of nitric oxide inhalations (30 manipulations on a daily basis) resulted in the modulation of blood serum crystallogenic properties, and the most intense physiological response took place when using minimum concentration of the agent (20 ppm). In this case we observed minimum deviation of crystalloscopic patterns from those typical for intact animals and full recovery in a month after the inhalation course. On the contrary, the application of higher NO concentrations (50 and 100 ppm) not only caused a considerable change in the bioliquid crystallogenic activity immediately after the manipulation, but also hindered the recovery processes. It should be noted that this modification is related both to the crystal structure of the pattern and the structure of its marginal protein zone.

Key words: nitric oxide, subchronic toxicity, crystallogenic properties, blood.

К СТРУКТУРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВАМ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЗАПАДНОГО СКЛОНА ЮЖНОГО УРАЛА

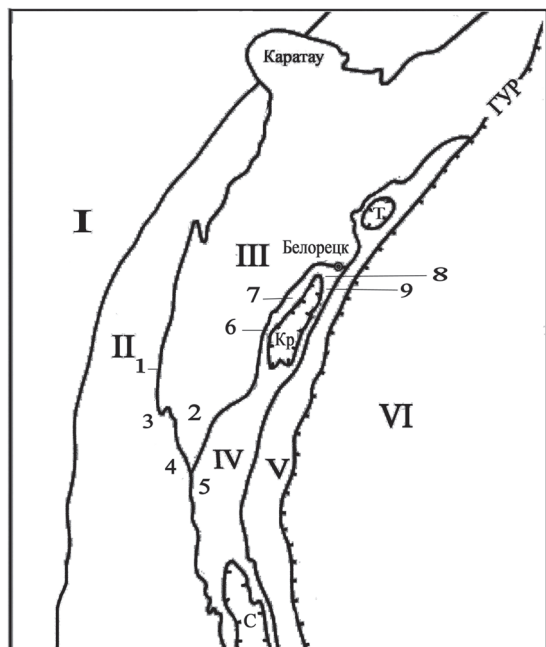
© Т.Т. Казанцева

Геология Зилаирского синклинали недостаточно изучена в нефтегазовом отношении. Особый интерес в этом плане вызывает район его северной части. Приводятся данные о субплатформенном типе осадков палеозоя, простой спокойной складчатой структуре пород, благоприятных для скопления здесь углеводородного сырья. Оценка возможности обнаружения залежей нефти и газа проводится как с традиционных представлений нефтегазовой геологии о перспективности объекта, так и с точки зрения нефтегазогенерирующих свойств сланцевых толщ, площади которых закартированы автором статьи. Здесь это доманикиты – сланцевые битуминозные породы афонинского горизонта среднего девона, отвечающие всем требованиям для отнесения их к перспективным объектам нетрадиционного типа.

Ключевые слова: нефтегазовая геология, палеозой, осадки, структура, углеводороды, нефть, газ, перспективы, сланцевые толщ, доманикиты.

Уральское складчатое сооружение по особенностям строения фундамента земной коры, а также составу и строению разрезов докембрия и палеозоя четко делится на две зоны: окраинноконтинентальную (миогео-синклинали) на западе и активной складчатой области (эвгеосинклинали) – на востоке. Границей раздела является антиклинорий Уралтау, прослеживающийся в мери-

диональном направлении от Южного до Полярного Урала. В тектоническом районировании Южного Урала (рис. 1) отражена крупная структура его западного склона – Зилаирский синклинали, – которая на западе сопряжена с Башкирским антиклинорием, а на востоке – с Уралтауской структурой. Центральная часть граничит с Предуральским краевым прогибом.



Условные обозначения:

I – Восточно-Европейская платформа

II – Бельская впадина Предуральского прогиба

III – Башкирский антиклинорий

IV – Зилаирский синклинали

V – Зона Уралтау

VI – Магнитогорский синклинали

T – Тирлянский шарьяж

Кр – Кракинский шарьяж

С – Сакмарский шарьяж

ГУР – Главный Уральский разлом

Цифры *1–9* – пункты изучения

инфрадоманика:

1–5 – Предуральского прогиба;

6–9 – северной части Зилаирского синклинали:

6 – р. Кайнуй;

7 – д. Узьян;

8 – хутор Новобельский;

9 – д. Шигаево

Рис. 1. Тектоническое районирование западного склона Южного Урала



Рис. 2. Контакт ордовика с нижележащими сланцами инзерской свиты рифея. Правый берег р. Белой, у турбазы «Агидель»

Зилаирский синклиорий входит в состав окраинноконтинентальной зоны Урала. Согласно данным геофизики, здесь развит архей-нижнепротерозойский кристаллический фундамент Восточно-Европейской платформы. Это предопределяет особенности строения всего вышележащего осадочного чехла, сложенного породами исключительно субплатформенного типа.

Трансгрессивное налегание ордовикских песчаников на рифейские образования в районе широтного течения р. Белой уже давно описано Б.М. Келлером, В.В. Хоментовским, С.Н. Краузе и В.А. Масловым и другими. Взаимоотношение палеозойской и рифейской структур наблюдается в естественном обнажении на правом берегу р. Белой, у турбазы «Агидель». Здесь можно видеть, как на интенсивно смятые в крутые складки рифейские образования с резким угловым несогласием налегают породы среднего и верхнего ордовика (рис. 2).

Результаты крупномасштабного картирования узловых участков и контактных зон, иногда в масштабе 1:2000, с привлечением большого объема горных выработок, с послынным описанием нескольких разрезов палеозойских отложений субплатформенного типа легли в основу схемы сопоставления стратиграфических колонок девонских отложений северной части Зилаирского синклиория (рис. 3).

Последовательно снизу вверх залегают горизонты: нижнего девона – ваяштинский, вязовской, кальцеоловый, бийский, среднего девона – афонинский, чувоской и чеславский, верхнего девона – нерасчлененные франские отложения и фаменско-нижнетурнейские толщи зилаирской серии. По составу все горизонты существенно карбонатные. К терригенным относятся лишь ваяштинский и чувоской. В составе афонинского присутствует в значительном количестве кремнистый и глинистый материалы, определяющие их сланцеватое строение.

Зилаирская свита представлена ритмитами полимиктового состава. Все горизонты охарактеризованы внушительными списками собранной нами руководящей фауны [1]. Важно отметить, что образования, слагающие палеозойский разрез северной части Зилаирского синклинория, не испытывают резких фациальных изменений по площади. Наблюдаются лишь закономерное и постепенное возрастание мощности осадков в восточном направлении и наращивание раз-

реза девона за счет появления нижнедевонских рифогенных известняков на восточном крыле структуры.

Однако геология Зилаирского синклинория недостаточно изучена в нефтегазовом отношении. Имеются лишь единичные работы, в той или иной мере освещающие эту проблему [2–4]. В настоящее время в этом плане особый интерес вызывает район северной центриклинали изучаемой структуры.

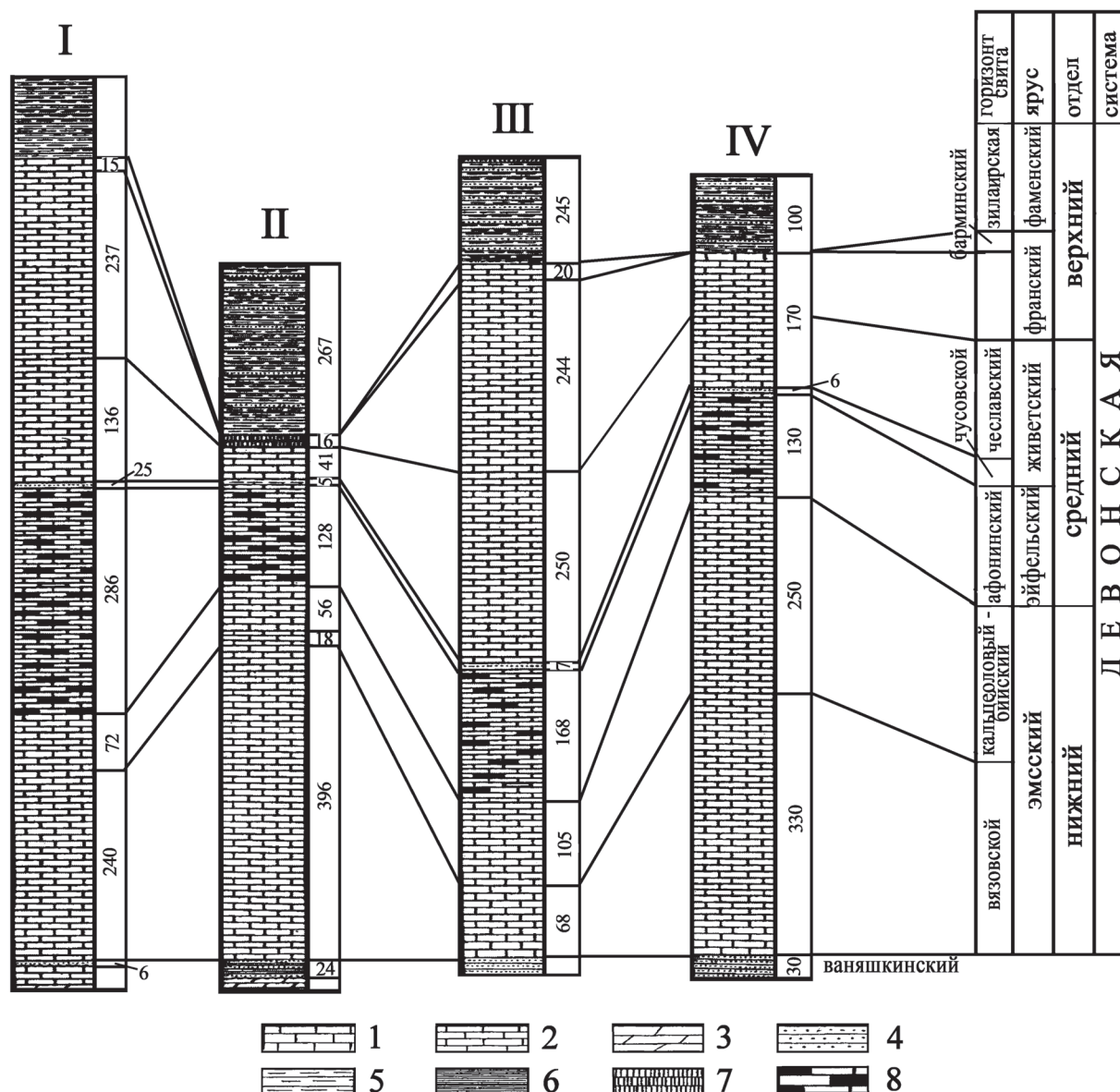


Рис. 3. Сопоставление стратиграфических колонок девонских отложений северной части Зилаирского синклинория. Условные обозначения: I – р. Кайнуй (по М.А. Камалетдинову, Т.Т. Казанцевой); II – р. Узян (по Т.Т. Казанцевой); III – д. Новобельской (по Т.Т. Казанцевой); IV – д. Шигаево (по Т.Т. Казанцевой). 1 – известняки; 2 – глинистые известняки; 3 – доломиты; 4 – песчаники; 5 – аргиллиты; 6 – глинистые сланцы; 7 – кремни; 8 – инфрадоманик (афонинский горизонт эйфельского яруса среднего девона)

Главной особенностью структуры здесь является более простое строение палеозойских отложений по сравнению с рифейским складчатым основанием. Центриклиналь хорошо выражена на геологических картах по закономерному воздыманию в северном направлении и замыканию к г. Белорецку выходов пород нижнего и среднего палеозоя, слагающих ядро и крылья синклинория. Синклинальное строение подчеркивается особенностями залегания всех маркирующих горизонтов, присутствующих в разрезе палеозоя (рис. 4). Особенно показательны в этом отношении ваяншинские слои нижнего девона, представленные маломощной песчано-глинистой пачкой. Работами Н.Ф. Решетникова, А.В. Клочихина и автора статьи эти слои были прослежены в виде непрерывной узкой полосы, огибающей со всех сторон район северного замыкания структуры. На рис. 4 показано общее строение синклинория в районе пересечения гипербазитового массива Северного Крака, на широте Узьян – Шигаево.

Следовательно, имеющиеся данные свидетельствуют о простом синклинальном строении изучаемого объекта. Это отображено структурно-формационными профилями (рис. 5). На геологическом разрезе в районе д. Узьян (западное крыло северной части Зилайрского синклинория) наблюдается падение слоев в восточном направлении (рис. 5А); в районе северной центриклинали (хутор Новобельский) все слои направлены к югу (рис. 5Б); а в районе д. Шигаево (восточное крыло этой же структуры) отмечается падение всех горизонтов в западном направлении (рис. 5В).

Синклиналь имеет асимметричное строение с относительно пологим западным, весьма пологим в районе северной центриклинали и более крутым восточным крылом. Углы падения слоев на западном крыле колеблются от 30 до 50°, на восточном – от 40 до 70°, а в северной центриклинали от 10 до 20. Пликативные структуры встречаются в породах лишь отдельных горизонтов, местами песчано-глинистые отложения зилайрской серии ослож-

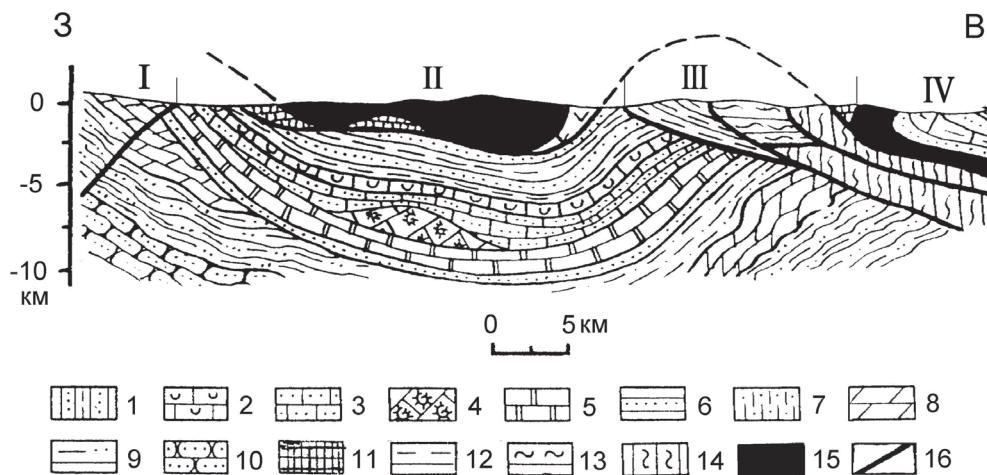


Рис. 4. Геологический разрез западного склона Ю. Урала в районе Северного Крака:

I – Башкирский антиклинорий; *II* – Зилайрский синклинорий; *III* – зона Уралтау; *IV* – Магнитогорский синклинорий.

Условные обозначения: Зилайрский синклинорий и Башкирский антиклинорий: *1* – зилайрская свита верхнего девона – нижнего карбона, граувакки, аргиллиты; *2* – франкий ярус, известняки, кремни; *3* – средний и нижний девон, известняки, аргиллиты, известково-глинистые породы, песчаники; *4* – нижний девон, массивные рифогенные известняки; *5* – силур, известняки, доломиты, глинистые сланцы; *6* – средний и верхний ордовик, кварцевые песчаники и конгломераты; *7* – верхний рифей, терригенные породы ашинской серии; *8* – миньярская свита, доломиты и известняки; *9* – катавская и инзерская свиты, известняки, мергели, серицито-глинистые сланцы; *10* – зильмердакская свита, кварцевые песчаники, кварциты, алевролиты. Зона Уралтау: *11* – силур, кремнистые сланцы; *12–14* – метаморфизованные породы суваянского и максютовского комплексов; *15* – гипербазиты; *16* – тектонические контакты

няются довольно интенсивной мелкой складчатостью в общем субмеридиональном простирании. Отмечаются и разрывные нарушения типа малоамплитудных надвигов и сдвиговых смещений. Такое строение является характерной особенностью геологии всего западного склона Южного Урала.

В северной центриклинальной зоне Зилаирского синклинория, в осевой, наиболее глубоко погруженной его части, на поверхности ритмичных осадков зилаирской серии верхнего девона, залегает крупный изолированный массив комплекса магматических и осадочных пород более древнего (нижне-среднепалеозойского) возраста. Он сложен гипербазитами, габброидами, диабазами, спилитами и кремнистыми сланцами, тектонически контактирующими между собой и с подстилающими толщами. Эти образования, генетически чуждые породам палеозоя, составляющим нормальный стратиграфический разрез

западного склона складчатой области, образуют сложно дислоцированный аллохтон, слагающий вершины и склоны гор Крака.

Структура пород аллохтона резко отличается от тектоники палеозойских образований автохтона. Она состоит из пород, свойственных зоне активной окраины континента. Раньше их считали эвгеосинклинальными образованиями. Это крайне интенсивно и сложно дислоцированные, сильно раздробленные и брекчированные толщи. В отличие от отложенных автохтона, не образуют сколько-нибудь выдержанных по простиранию стратиграфических горизонтов или закономерно построенных складчатых структур. Высокая степень перемятости, мозаичное, лоскутное размещение в плане пород разного возраста и вещественного состава; широкое развитие милонитов и глыбовых горизонтов, все это свидетельствует о мощных тектонических напряжениях, существовавших при формировании Кракинского шарьяжа.

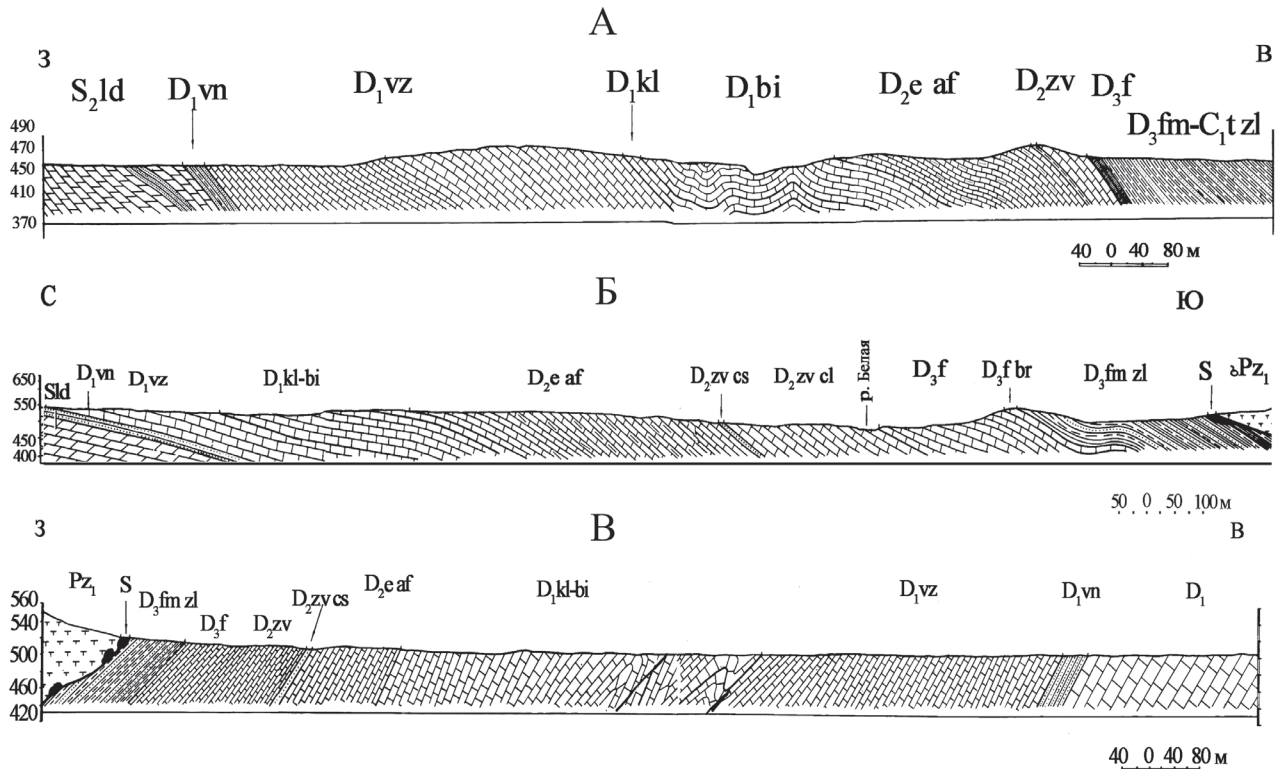


Рис. 5. Структурно-формационные профили северной части Зилаирского синклинория: А – западное крыло, на широте д. Узьян; Б – северная центриклиналь, в районе д. Новобельский; В – восточное крыло, у д. Шигаево.

Условные обозначения:

- доломиты
- известняки сланцеватые
- глинистые сланцы
- аргиллиты
- песчаники
- серпентиниты
- известняки
- тектонические контакты

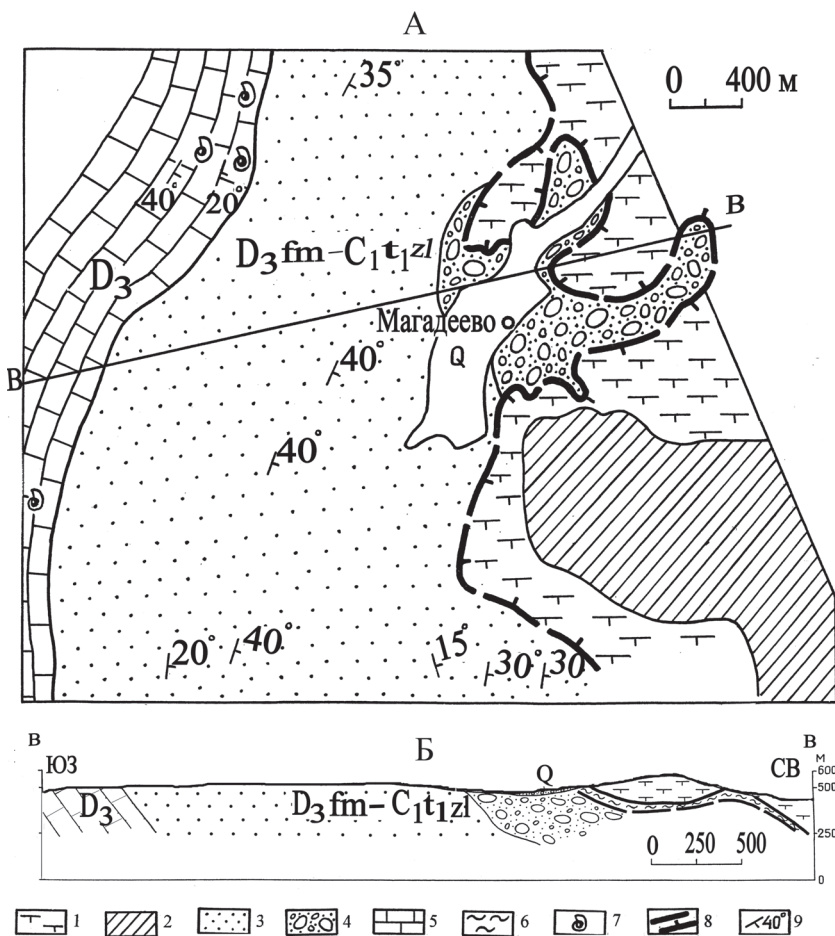


Рис. 6. А – схема геологического строения; Б – геологический разрез по линии В-В в районе д. Магадеево
 Условные обозначения: 1 – серпентиниты; 2 – гипербазиты; 3 – флишиды; 4 – глыбовая зона; 5 – средне-верхнедевонские известняки; 6 – милониты; 7 – сборы фауны; 8 – тектонические контакты; 9 – элементы залегания слоев

Глыбовые образования, располагающиеся в основании шарьяжа (олистостром и серпентинитовый меланж), впервые обнаружены, закартированы и описаны во многих местах автором, совместно с Ю.В. Казанцевым и М.А. Камалетдиновым [5]. Геологическое строение одного из таких участков (район д. Магадеево) показано на рис. 6.

Итак, Кракинский шарьяж приурочен к синклиальному погружению в породах постели. Характер границ шарьяжа в плане и данные геофизики свидетельствуют о его асимметричной структуре с более глубоким залеганием подошвы в восточной части. Эти данные согласуются с показанными выше особенностями структуры подстилающих пород

зилаирской серии. Породы аллохтона и постели надвига смяты, в общем, согласно, что подтверждается и наличием вдоль южного края массивов Крака тектонического полуокна, сложенного зилаирскими породами, имеющими антиклинальную структуру.

Изложенные представления о геологии северной части Зилаирского синклинория позволяют оценивать **перспективы нефтегазоносности** данной структуры Южного Урала с иных позиций, чем это было принято. Если ранее предполагалось, что гипербазиты массивов Крака внедрились в толщу палеозойских пород Зилаирского синклинория и, следовательно, могли разрушить существовавшие здесь ранее залежи нефти и газа, то сейчас можно утверждать, что процессы вариссийского тектогенеза не были губительными для скоплений углеводородов в этом регионе. В приведенных реконструкциях теряет основу и представление об интенсивной раздробленности ложа Зилаирского синклинория на многочисленные мелкие блоки, с которыми некоторые исследователи связывали происхождение гипербазитовых массивов Крака.

Указанным представлениям о геологии Зилаирского синклинория противопоставляется относительно простая и спокойная складчатая структура осадочных пород палеозоя субплатформенного типа, сформировавшихся на жестком архей-нижнепротерозойском кристаллическом фундаменте Восточно-Европейской платформы. Следовательно, общая геологическая ситуация рассматриваемой территории Урала с традиционных представлений о перспективности региона является благоприятной для скоплений в ее недрах углеводород-

ного сырья. Так, ордовикские отложения здесь сложены в основном кварцевыми песчаниками, мощность которых изменяется от нескольких до 100–150 м. Отдельные прослои песчаников, обладающие, по нашим данным, пористостью до 30–35%, могут служить коллекторами для скоплений нефти и газа. Среди пород силура потенциально нефтегазоносными следует считать доломиты ландовери и лудлова. Толща глинистых сланцев венлока (не содержащих органическое вещество) может служить надежной крышкой, предохраняющей залежи от разрушения. Мощные рифогенные известняки нижнего девона, обнажающиеся в районе г. Белорецка, в южном направлении, по-видимому, погружаются под покрывающие их средне-верхнедевонские отложения и более древние породы Кракинского шарьяжа (см. рис. 4). Поиски нижнедевонских рифов представляют большой интерес для нефтяников, так как с погребенными рифами разного возраста в различных геологических регионах обычно связаны богатые скопления нефти и газа. Средне- и верхнедевонские отложения (до франских включительно), слагающие субплатформенный разрез Зилаирского синклинория, связаны общностью фаций с одновозрастными породами восточной окраины Восточно-Европейской платформы, региональная нефтегазоносность которых известна для обширных площадей Урало-Поволжья. В разрезе девона Зилаирского синклинория в качестве потенциально нефтегазоносных горизонтов могут быть выделены кварцевые песчаники такатинских, ваянских, кальцеловых и чувовских слоев нижнего и среднего девона, а также граувакковые песчаники зилаирской серии фамена верхнего девона. Среди карбонатных пород перспективными на нефть и газ являются трещиноватые, прослоями пористые и кавернозные девонские известняки вязовских, бийских, чеславских слоев, а также франского яруса.

В данной статье обратим особое внимание не только на традиционные источники углеводородного сырья, но и покажем современное значение присутствия в разрезах палеозоя северной части Зилаирского синклинор-

рия битуминозных толщ сланцевой текстуры, состав и строение которых позволяют относить их к нетрадиционным запасам. Основными характерными чертами этих образований являются: многокомпонентность состава (кроме преобладающего в количественном отношении карбонатного материала присутствует значительный объем глинистого вещества, свободный кремнезем в концентрациях 10–15% и органическое вещество 3–5%); определенные структурные особенности, в частности тонкослоистость и сланцеватость; а также депрессионность фациальных условий с фауной *Coniconchia*: *Styliolina* sp. и *Tentaculites* sp.

Известно, что главным источником углеводородов продуктивных комплексов палеозоя Волго-Уральской нефтегазоносной провинции считаются битуминозные породы доманика (франский ярус верхнего девона), а также приравненные к ним образования, известные как доманикиты либо доманикоиды. В Зилаирском синклинории к нефтегазогенерирующим формациям сланцевого типа относится и инфрадоманик – доманикит эйфельского яруса среднего девона, который неизменно присутствует в составе субплатформенного палеозоя всего территориального объекта. Они имеют площадное размещение на территории Башкирии в пределах Бельской впадины Предуральского передового прогиба и северной половины Зилаирского синклинория вплоть до д. Мурадымово, где вскрыты скважиной в Мурадымовском ущелье.

Приведем обобщенное описание *доманикита афонинского горизонта среднего девона (инфродоманика)* на территории северной части Зилаирского синклинория, где он имеет значительное распространение. Темная окраска, тонкослоистая структура, битуминозность, развитие глинисто-карбонатных сланцев и линз кремней позволяют уверенно выделять породы афонинского горизонта среди сравнительно однообразных карбонатных осадков среднего девона. Они залегают на подстилающем бийском горизонте согласно. Граница между ними проводится по появлению известняков с прослоями, переполненными *Coniconchia*. Отложения афонинского



Рис. 7. Вязовской горизонт эмского яруса нижнего девона на восточной окраине д. Кага

горизонта изучались нами в разрезах по рекам Кайнуй и Узян, у деревень Новобельской и Шигаево, в долине левого берега р. Белой, в 1.5 и 3.3 км южнее окраины д. Узян и в других пунктах.

На правом берегу р. Кайнуй этот горизонт сложен известняками темно-серыми и серыми, тонкослоистыми, часто глинистыми. Отдельные тонкие (0.03 м) прослойки известняков чередуются с глинисто-карбонатными сланцами. Отмечены прослой (до 0.1 м) темных афанитовых кремней, с мелкими пустотками выщелачивания и последующего ожелезнения. На плоскостях наслоения встречаются многочисленные *Styliolina* sp. и *Tentaculites* sp. В 80 м ниже кровли афонинского горизонта залегает 1.5-метровый слой желтовато-серого, среднезернистого кварцевого песчаника. Породы смяты в мелкие складки, мощность их – 286 м.

В разрезе р. Узян на толстослоистых темно-серых известняках с фауной бийского горизонта залегают известняки серые, тонко-, реже мелкозернистые, тонкослоистые, участками перекристаллизованные, с прослоями, переполненными *Styliolina* sp., *Tentaculites* sp. Встречаются прослой глинисто-карбонатных

сланцев, светлоокрашенных, листоватых. Толщина слоев 1–20 мм. Мощность афонинских отложений здесь 126 м.

На среднедевонский возраст известняков, обнажающихся в 3.3 км южнее д. Узян, указывают находки *Stromatopora* sp., *Caliapora* sp. (ex. gr. *elegans* Sok.), *Mansuophyllum* sp., *Heliophyllum* sp., а также *Alveolites* sp., *Aulopora* sp., *Syringopora supragigantea* Sok., *Arcophyllum* *typus* Mark., встреченные в 100 м западнее предыдущего пункта. Аналогичный литологический состав и фаунистическая характеристика отличают афонинский горизонт и в других разрезах рассматриваемого района.

К.И. Андрианова и Н.Я. Спасский указывают на присутствие афонинского горизонта в разрезах по рекам Кага и Кайнуй, где он представлен темно-серыми глинистыми известняками, с прослоями кремней, кремнистых и известковых сланцев, заключающих *Thamnopora* sp., *Alveolites* ex gr. *cavernosus* Lec. и *Copiconchia*. Мощность афонинского горизонта в северной части Зилаирского синклинория 12–286 м.

Большой интерес представляет и вязовской горизонт эмского яруса нижнего дево-

на, который близок по структуре и составу к афонинскому. Здесь сланцеватость характерна лишь для отдельных участков разреза, но битуминозность проявлена более четко. Отличительной особенностью его является широкое развитие фауны остракод, которые часто слагают остракодовые слои и даже их кладбища (рис. 7).

Вязовской горизонт залегает на ваяшкском с постепенным переходом. Нижняя граница проводится в основании карбонатной толщи, содержащей подчиненные прослои глинистых сланцев и песчаников. Характерной особенностью литологического состава является подавляющее преобладание известняков битуминозных, тонкокристаллических, темноокрашенных, часто глинистых, слоистых и плитчатых.

В разрезе по р. Кайнуй ваяшкские песчаники вверх по разрезу постепенно переходят в глинисто-карбонатные отложения вязовского горизонта, представленные здесь толщей темно-серых, слоистых, глинистых известняков. Отдельные прослои переполнены гигантскими (до 3 см) остракодами: *Moelleritia barbotana* (Schm.) и *M. moelleri* (Schm.) Характерно раскалывание известняков по бугристым плоскостям наслоения, к которым и приурочены скопления остракод. В нижней части толщи встречено два прослоя желтовато-серых мелкозернистых кварцевых песчаников мощностью 1 и 1.5 м, литологически не отличающихся от ваяшкских. Мощность вязовского горизонта в разрезе р. Кайнуй – 240 м.

В разрезе по р. Узян вязовской горизонт разделяется на две толщи. Нижняя из них представлена известняками темно-серыми, почти черными, тонко- и мелкозернистыми, прослоями глинистыми, значительно битуминозными, с бугорчатыми и узловатыми поверхностями напластования. В этой толще встречаются маломощные (до 15 см) прослои глинистых сланцев, темно-серых, листоватых, сильно разрушенных и алевроитовых аргиллитов, зелено-серых, густо трещиноватых, «оскольчатых». Толща характеризуется обилием остракод, размерами от долей миллиметра до

4 см. Крупные остракоды сконцентрированы послойно. Мелкие остракоды переполняют все разновидности известняков этой толщи.

Здесь нами собраны: *Moelleritia bartotana* (Schm.), *M. sp.*, *Aparchitellina domratchevi* Pol., *A. adrianovae* Pol., *A. ex gr. decorata* Pol., *A. irgislensis* Rozhd., *Clavofabellina abunda* (Pol.), *Pribylites* (*Parapribylites*) aff. *laminosus* Rozhd., *Pr.* (*Parapribylites*) sp., *Gravia* sp., *Selebratina* sp., *Evlanella fregis* Pol., *Knoxiiella inserica* Pol., *Janetina* aff. *thecoidea* Rozhb., *Uchtovia* aff. *egorovi* Pol., *Cavellina indistincta* Pol., *C. clara* Pol., *Microcheilinella kordonica* Pol., *M. aff. kordonica* Pol., *Samerella reversa* (Pol.), *Bairdiocypris* aff. *biesenbachi* Komm., *Healdianella* sp., *Carbonita grandis* Pol., *Parabairdiocypris* aff. *holuschurmensis* (Pol.), *P. sp.* Мощность нижней толщи 220 м.

Верхняя толща представлена известняками темными, тонкозернистыми и битуминозными с отдельными прослоями более светлой окраски и афанитовой структуры. Наблюдается окремнение в виде линзообразных прослоев и участков неправильной формы. В низах этой толщи встречены остракоды: *Moelleritia* sp., *Aparchitellina adrianovae* Pol., *A. domratchevi* Pol., *A. irgislensis* Rozhd., *Clavofabellina abunda* (Pol.), *Cavellina indistincta* Pol., *C. clara* Pol., *Samerella reversa* (Pol.), *Parabairdiocypris* cf. *holuschurmensis* (Pol.), *P. sp.* Мощность верхней толщи 176 м.

Состав вязовского горизонта, вскрытого горными выработками в 3.5 км севернее д. Новобельской, аналогичен описанному по р. Узян. Здесь преобладают известняки слабо глинистые, почти черные, тонкозернистые, трещиноватые, с многочисленными мелкими остракодами: *Aparchitellina domratchevi* Pol., *Clavofabellina abunda* (Pol.), *Cavellina indistincta* Pol., *C. clara* Pol., *Microcheilinella kordonica* Pol., *Carbonita grandis* Pol., *Parabairdiocypris* aff. *holuschurmensis* (Pol.). Мощность его в этом разрезе 110 м.

На восточном крыле Зилаирского синклинория, в разрезе у д. Шигаево, вязовской горизонт выделен нами впервые. Породы его обнажаются в 10 м выше кварцевых песчаников ваяшкского горизонта. По составу и строению мало чем отличается от других разрезов.

Присутствуют доманикиты среднего девона и под надвигами в пределах восточной части Юрюзано-Сылвенской впадины Предуралья. Здесь, по данным Ю.В. Казанцева и др. [6], со ссылкой на Н.П. Малахову, скважина № 281, пробуренная в 5 км к востоку от с. Суоямский Бугор (р. Суоям), на глубине 593.4 м вскрыла палеозойские черные кремнистые известняки. Они располагаются ниже полосчатых мигматитов древнего тараташского комплекса, и вниз по разрезу на глубине 645 м сменяются серыми коралловыми известняками живетского и нижнефранского ярусов. Ниже, в интервале 719–892.9 м вновь обнаружены аналогичные интервалу 593.4–645 м черные кремнистые известняки, доломитизированные и переполненные кониконхиями. Скорее всего, это доманикит среднедевонского возраста [7].

Близкий среднедевонскому доманикиту по битуминозности и характеру строения является и вязовской горизонт эмского яруса нижнего девона, залегающий между ваяш-кинским и бийским горизонтами. Мы считаем эти два объекта наиболее перспективными на поиски месторождений углеводородов в сланцевых толщах.

Но освоение инфрадоманика при современном состоянии технологии извлечения считается нерентабельным и экологически небезопасным. Показательны в этом плане данные В.П. Якуцени, А.М. Жарков и Ю.Э. Петрова [8], согласно которым себестоимость сланцевого газа зависит от геологических условий конкретного объекта и оценивается экспертами на уровне от 150 до 300 дол/тыс. м³, что в 5–10 раз дороже, чем себестоимость добычи традиционного газа. Кроме того, добыча сланцевого газа отрицательно сказывается на экологии окружающей среды, прежде всего ухудшается качество питьевой воды. Потому во Франции в 2011 г. сенат проголосовал за запрет применения метода гидроразрыва пласта, используемого при его добыче. Примерно также относятся к этой проблеме в Германии. Однако страны с дефицитом энергосырья проявляют повышенный интерес к возможности разработки нетрадиционного сырья. К таким

странам относится Испания, где выделен мощный перспективный комплекс подобных пород и где планируется бурение оценочных скважин на оконтуривание газосланцевых толщ. Большие запасы сланцевого газа выделены в Польше, где в Гданьской впадине уже получен первый приток. В России же к наиболее крупным по площади распространения газосланцевым формациям относят баженовскую свиту Сибири, упомянутую выше доманиковую Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, кумскую и хадумскую свиты Северного Кавказа. По оценкам ВНИГРИ, в общем Россия обладает прогнозными ресурсами сланцевых углеводородов: нефти – 11.3 млрд т, газа – 9.5 трлн м³. Лидером в освоении сланцевого газа, как известно, является США. Промышленная добыча его здесь началась в 2002 г. и уже достигла 23% от общей добычи природного газа. Технологией добычи углеводородов из сланцевых толщ интересуются многие страны, в том числе Китай и Индия.

Как пишут эти же авторы, углеводороды сланцевых толщ не могут активно перемещаться лишь под влиянием создаваемых бурением техногенных депрессий. Необходимы дополнительные воздействия на содержащие их пласты, что, естественно, удорожает и стоимость разработки. Вместе с тем известно, что площади их распространения значительно превышают занятые традиционными источниками. Поэтому сланцевые толщи в настоящее время приобретают все возрастающий интерес.

Подобные проблемы беспокоят общественность и экологов, в том числе и Башкирии. Но, с нашей точки зрения, усилия ученых должны быть направлены на поиски и разработку таких технологий и методов, которые были бы не только безопасны для окружающей среды и населения, но и, по возможности, могли бы стать полезными обществу. В настоящее время такие идеи придумываются [1].

Как известно, методика освоения сланцевых углеводородов, используемая Америкой, основана, во-первых, на применении горизонтального бурения, что способствует

возрастанию техногенных нагрузок именно тангенциальной направленности, а во-вторых, базируется на эффективности метода гидроразрыва пластов. В этом случае мощный направленный поток воды не только обеспечивает водородом образование углеводородов из органического вещества, но и способствует расчленению сланцевых пород на множество пластинок, перемещения которых создают дополнительную энергию и способствуют образованию коллекторов.

Не секрет, что при освоении любых природных ресурсов используются фундаментальные знания, в том числе и теоретические разработки в области происхождения каждого из видов полезных ископаемых. Углеводороды не представляют исключения. В этом плане хотим обратить внимание на опубликованную нами работу о происхождении нефти более тридцати лет назад [5]. В ней доказывалось, что мощное боковое давление (тектонические субгоризонтальные напряжения сжатия) приводило не только к формированию локальных структур, но и обеспечивало термобарические условия для физико-химических превращений органического вещества в углеводороды. Механизм образования нефти представляется в следующем виде. Силы бокового давления и повышенные в этих условиях значения температур в периоды максимальных тектонических напряжений достигают определенных участков платформ, вызывая в толще осадков с достаточным количеством органического вещества преобразование последнего в углеводороды. При достижении максимальных горизонтальных напряжений сжатия происходит скалывание толщ с образованием надвигов, способствующих, с одной стороны, формированию положительных структур, с другой – резкому снижению давлений в зонах разрывов. Таким путем в пределах соседних участков среды создается контрастная обстановка с большим перепадом давления, что способствует увеличению подвижности флюидов и обеспечивает их миграцию и нагнетание из областей больших давлений в зоны малых ее значений. В этом

заключается определяющее значение надвигов (и других разрывных дислокаций) как структур, обеспечивающих аккумуляцию и миграцию углеводородов. Разного уровня смещения представляют собой зоны интенсивного дробления, высокопроницаемые для флюидов и газов. Они пользуются широким распространением, обеспечивая «сбор» углеводородов на обширных площадях и по всей мощности осадочного чехла. Это геодинамическая модель нефтегазообразования [4]. Представляется, что приведенные выше суждения согласуются с аспектами современной технологии их извлечения.

Итак, общая геологическая ситуация названного синклиория, особенности его строения, повышенная битуминозность пород всего палеозоя, сланцевая структура отдельных горизонтов (в частности, афонинского и частично вязовского), наличие слоев, обладающих коллекторскими свойствами, и пород-покрышек позволяют рекомендовать данную территорию как перспективную на поиски углеводородных залежей. Особое внимание уделено инфрадоманику, который рассматривается как нефтегазогенерирующий объект, аналогичный доманику франского яруса верхнего девона. Акцентируется внимание на его площадном распространении и запечатывании непроницаемыми породами офиолитового аллохтона гор Крака, который сложен гипербазитовыми телами сравнительно небольшой мощности. Они в краевых и подошвенных зонах серпентинизированы или полностью превращены в серпентиниты. Основным породообразующим минералом является серпентин, который, согласно структуре его кристаллической решетки, обладает свойствами высокой степени непроницаемости.

Литература

1. Казанцева Т.Т. О происхождении и сохранении феномена горы Янгантау // Вестник академии наук РБ. 2013. Т. 19, № 3. С. 16–28.
2. Исмагилов Р.А. Геология и перспективы нефтегазоносности Зилаирского синклиория Южного Урала. Уфа: Гилем, 2012. 184 с.

3. Казанцева Т.Т. Геологическое строение северной части Зилаирского синклиория Южного Урала в связи с перспективами нефтегазоносности: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГИН АН СССР, 1970. 23 с.

4. Казанцева Т.Т. К общей концепции генезиса нефти // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. 2012. № 1. С. 31–38.

5. Казанцева Т.Т., Камалетдинов М.А., Казанцев Ю.В., Зуфарова Н.А. Происхождение нефти. Уфа: БФАН СССР, 1982. С. 30.

6. Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т., Загребина А.И., Газизова С.А. Структурная геология северо-востока Башкортостана. Уфа, 1999. 131 с.

7. Фархутдинов И.М., Фархутдинов А.М. Поднадвиговая зона Юрюзано-Сылвенской депрессии – новый перспективный объект для поисков нефти и газа // Бурение и нефть. 2012. № 4. С. 26–28.

8. Якуцени В.П., Жарков А.М., Петров Ю.Э. Нетрадиционные источники природных газов: перспективы и проблемы их освоения // Геология нефти и газа. № 6. 2012. С. 63–77.



ON STRUCTURAL GEOLOGY AND PETROLEUM POTENTIAL OF THE WESTERN SLOPE OF THE SOUTH URALS

© **Т.Т. Kazantseva**

Institute of Geology, Ufa Scientific Centre, RAS,
16/2, ulitsa K. Marksa, 450077, Ufa, Russian Federation

The geology of the Zilair Synclinorium remains poorly investigated for oil and gas. Its northern area is of particular interest in this respect. The paper gives data on the subplatform type of Paleozoic sediments and the simple relaxed folded structure of rocks favourable for accumulating hydrocarbons. The assessment of the possibility for finding oil and gas is conducted both from traditional notions of petroleum geology on promising targets and from the point of view on oil and gas generating properties of shale strata mapped by the author of this paper. These are domankites, i.e. Middle Devonian bituminous shale rocks of the Afonino horizon that meet all the requirements for considering them as unconventional promising sources.

Key words: petroleum geology, Paleozoic sediments, structure, hydrocarbons, oil, gas, prospects, shale strata, domankites.

УДК 556.314

ГЕОХИМИЯ И ГЕНЕЗИС РАССОЛОВ КОЛВИНСКОГО ВАЛА ПЕЧОРСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

© В.Г. Попов, Р.Ф. Абдрахманов

Рассматриваются гидрогеохимические особенности нефтегазовых месторождений Колвинского вала. В формировании гидрогеохимии этой структуры важную роль играют процессы метаморфизации, протекающие по механизмам ионообменной адсорбции и абсорбции в седиментационных и инфильтрационных системах гидростратисферы. Спецификой региона является то, что нормальная гидрогеохимическая зональность, свойственная платформенным осадочным бассейнам, здесь оказалась преобразованной в инверсионную вследствие внедрения в среднедевонско-турнейский водоносный комплекс глубинных парогазовых флюидов из залегающих на байкальском фундаменте осадочных комплексов раннего палеозоя. Особое внимание уделено опресненным рассолам среднедевонско-турнейских отложений, создающим геохимическую инверсию в гидростратисфере. Природа ее связывается с процессами дистилляции воды в угледородородную газовую фазу в смежных с байкальским фундаментом комплексах раннего палеозоя и последующей восходящей миграции и конденсации парогазового флюида в области пониженных термобарических параметров.

Ключевые слова: Колвинский вал, нефтегазовые месторождения, гидрогеохимическая инверсия, конденсатогенные воды.

Общие положения. Колвинский вал – линейно вытянутая структура, разделяющая Денисовскую и Хорейверскую впадины Печорской синеклизы, – прослеживается с юга на север на 300 км при ширине до 35 км и амплитуде поднятия около 1000 м (рис. 1). Под фанерозойским чехлом, сложенным терригенно-карбонатными осадками, залегают кристаллические образования байкальского фундамента.

С запада и востока Колвинский вал ограничен надвигами, прослеживающимися в фундаменте и осадочных комплексах палеозоя (ордовик–пермь). Во фронтальной части его расположены Усинская, Возейская, Харьягинская, Ярейюская и Хыльчююская антиклинальные складки. Сам Колвинский вал осложнен несколькими встречными, падающими на запад, дизъюнктивными нарушениями. С тектонической мобильностью вала связан довольно напряженный тепловой режим

недр: величина геотермического градиента здесь в среднем составляет $2.7^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, тогда как на соседних структурах синеклизы она $< 2.0\text{--}2.2^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ [1]. На поверхности фундамента T достигает $160\text{--}184^{\circ}\text{C}$.

Залежи нефти, газа и газоконденсата установлены в стратиграфическом интервале от силура–нижнего девона (Возейское и Усинское месторождения) до верхней перми–триаса (Хыльчююское, Ярейюское и Харьягинское месторождения).

В гидрогеологическом отношении Колвинский вал является частью Большеземельского бассейна, входящего в Печорскую артезианскую область. Рифейские и вендские метаосадочные образования фундамента вскрыты в соседней к западу Мезенской синеклизе на глубине $0.95\text{--}2.7\text{ км}$. В них заключены Cl-Na-Ca азотные и метаново-азотные рассолы с минерализацией (М) $134\text{--}271\text{ г/дм}^3$ и величиной $r\text{Na}/r\text{Cl}$ $0.5\text{--}0.8$.

ПОПОВ Владимир Георгиевич – д.г.-м.н., Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ), e-mail: popovvg@novoch.ru

АБДРАХМАНОВ Рафил Фазылович – д.г.-м.н., Институт геологии Уфимского научного центра РАН, e-mail: hydro@ufaras.ru

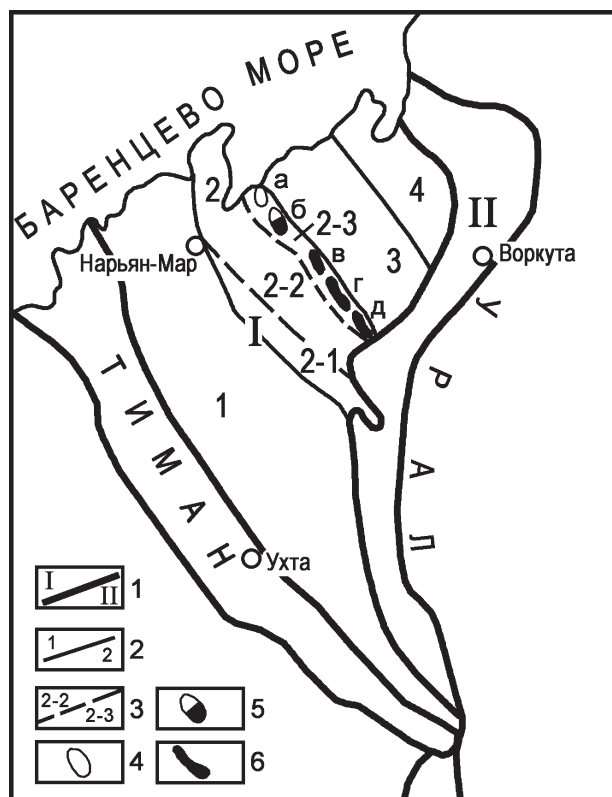


Рис. 1. Тектоническая схема Печорской синеклизы (по [3] с дополнениями): 1–3 – границы структур: I – первого порядка (I – Печорская синеклиза, II – Верхнепечорская впадина), 2 – второго порядка (1 – Ижма-Печорская впадина, 2 – Печоро-Колвинский авлакоген, 3 – Хорейверская впадина, 4 – Варандей-Адзвинский авлакоген), 3 – третьего порядка (2-1 – Печоро-Кожвинский вал, 2-2 – Денисовская впадина, 2-3 – Колвинский вал; 4–6 – месторождения: 4 – газоконденсатные (а – Хыльчюуское), 2 – газонефтяные (б – Ярейюское), 3 – нефтяные (в – Харьягинское, г – Возейское, д – Усинское)

В осадочном чехле выделяются [2] ордовикско-нижнедевонский терригенно-карбонатный, среднедевонско-нижнефранский терригенный, верхнефранско-турнейский карбонатный, визейско-артинский карбонатный, кунгурско-нижнетриасовый терригенный и мезозойско-кайнозойский терригенный водоносные комплексы (ВК).

Гидрогеохимические особенности седиментогенеза

Современные гидрогеохимические условия региона являются отражением его длительной естественно-исторической эволю-

ции. Осадконакопление в палеозое протекало главным образом в талассогенных бассейнах с нормальной и слабо повышенной соленостью. С ними связаны мощные толщи карбонатных пород силура–перми, слагающие до 60% разреза.

Процессы галогенеза в геологической истории бассейна не получили широкого развития и проявились лишь в начальной доломитово-гипсовой стадии (позднесилурийско–раннеордовикская эпоха и серпуховское время раннего карбона), когда М вод лагунно-морских бассейнов достигала 150 г/дм³ и выше, а плотность с 1.15 г/см³ относительно 36 г/дм³ и 1.03 г/см³ у нормальной морской воды. Согласно теории галогенеза, рассолы этих стадий имели Cl-Mg-Na состав. Карбонатно-сульфатное соленакопление сопровождалось гравитационным погружением маточных рассолов в нижележащие осадочные комплексы и вытеснением из них преимущественно морских формационных вод. В отличие от расположенных к югу структур Русской плиты в Большеземельском бассейне эвапориты залегают не в верхней (пермской), а в средней (С₁) и нижней (О-S) частях осадочного чехла, что не является благоприятным фактором формирования мощной зоны крепких рассолов.

Инфильтрационные этапы, соответствующие континентальным перерывам, наблюдались в досреднеэйфельское время среднего девона, позднеурнейско–ранневизейское время нижнего карбона [3]. Однако глубина проникновения маломинерализованных вод атмосферного питания не превышала первых сотен метров. К тому же следующие за континентальными перерывами морские трансгрессии неизбежно приводили к замещению инфильтрогенных вод талассогенными. Преимущественно в континентальных условиях происходило терригенное осадконакопление в мезозое и кайнозое, когда глубина проникновения инфильтрогенных вод в палеозойскую толщу регламентировалась положением уровня Баренцева моря – региональной области дренажа верхнего гидрогеодинамического этажа.

Как видно, в истории гидрогеологического развития бассейна седиментационные этапы по продолжительности намного (более чем в 5 раз) превосходили инфильтрационные, что способствовало накоплению и захоронению в осадках талассогенных вод с нормальной и повышенной соленостью, испытавших некоторое смешение с метеогенными водами.

Вертикальная гидрогеохимическая зональность

Анализ данных по геохимии подземных вод Колвинского вала указывает на инверсионный характер вертикальной гидрогеохимической зональности. В северной части вала на Хыльчуйском газоконденсатном и Яреюском газонефтяном месторождениях в верхней части разреза (мел–верхи визе) по мере углубления до 2.2 км, М вод постепенно нарастает до 70 г/дм³ в соответствии с градиентом 3 г/дм³ на 100 м (рис. 2). Пресные и соленые воды сменяются слабыми Cl-Na и Ca-Na рассолами с непостоянной степенью метаморфизации (rNa/rCl 0.1-1.9). Преобладает хлоркальциевый тип вод (по Сулину) с содержанием CaCl₂ до 40–50%.

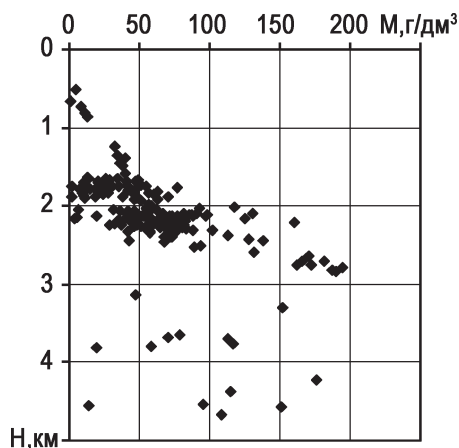


Рис. 2. Изменение М подземных вод с глубиной (Хыльчуйское и Яреюское месторождения)

В нижней части визейского и верхней части верхнефранско-турнейского ВК (под серпуховской и нижневизейской водоупорными толщами) на глубине до 2.8 км происходит интенсивный рост М (до 200 г/дм³) Cl-Na вод согласно средней величине гради-

ента 25 г/дм³ на 100 м. Рассолы отличаются умеренной метаморфизацией (rNa/rCl 0.7–0.8, CaCl₂ 15–20%), низкими значениями отношения Cl/Br – 310–150 и высокими rSO₄ · 100/rCl – 1–5 (рис. 3).

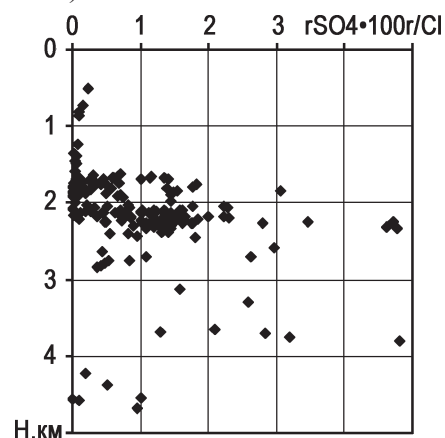


Рис. 3. Изменение сульфатности подземных вод с глубиной

Еще глубже рассолы претерпевают кардинальную геохимическую трансформацию. В средней и нижней части верхнефранско-турнейского и в среднедевонско-нижнефранском ВК наблюдается резкое снижение М до 152-95-47-14 г/дм³ (градиент 15 г/дм³ на 100 м) при сохранении хлоркальциевого типа воды. Более чем 10-кратное опреснение пластовых рассолов прослеживается до глубины 4.7 км. Метаморфизация их изменений не претерпевает (CaCl₂ 15–25%), а сульфатность снижается (rSO₄ · 100/rCl < 1).

Инверсионный тип гидрогеохимического разреза характерен не только северной части вала, но центральной (Харьягинское месторождение) и южной (Возейское и Усинское месторождения) частям, т.е. Колвинскому валу в целом [4]. Причем на центральном и южном блоках вала ниже зоны опреснения М рассолов вновь возрастает до 170–180 г/дм³ (рис. 4). С учетом этого, а также принимая во внимание наличие крепких (М до 270 г/дм³) хлоркальциевых рассолов в позднем протерозое, гидрогеохимический разрез Колвинского вала может быть представлен в виде: А₁ В₃₆ В₂₀₀ В_{<36} В_{<200}.

Важно отметить, что с гидрогеохимическими инверсиями ассоциируются газоконденсат-

ные, нефтегазовые и нефтяные месторождения (см. рис. 1) в разных частях разреза (от силура–нижнего девона до перми–нижнего триаса).

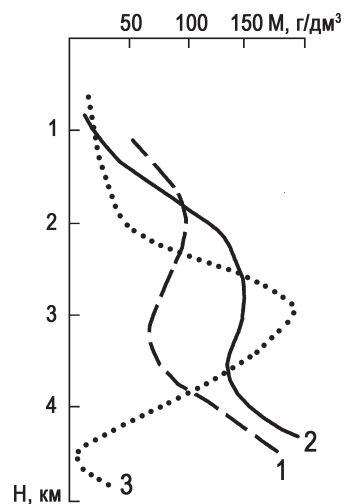


Рис. 4. Сводные гидрогеохимические разрезы Колвинского вала (по [4], с изменениями): 1–3 – месторождения: 1 – Усинское и Возейское, 2 – Харьягинское, 3 – Хыльчуйское и Яреюское

Гидрогеохимия брома и йода в рассолах в связи с их формированием

Содержание Br^- – типичного галофильного элемента, накапливающегося в морской воде по мере ее испарительного концентрирования, – зависит от величины M и глубины залегания рассолов. По мере увеличения M концентрация Br^- растет от 2–5 до 200–250, иногда 450–530 мг/дм^3 (рис. 5). Происходит рост концентрации Br^- и с глубиной, но в водах геохимической инверсии она обычно ниже (160–230 мг/дм^3), чем в фоновых рассолах.

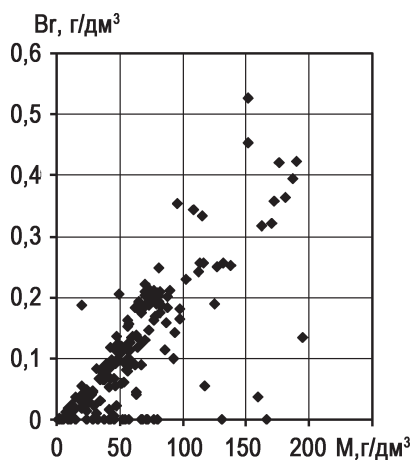


Рис. 5. Зависимость содержания Br^- от величины M подземных вод

В целом невысокие концентрации Br^- в рассолах объясняются отсутствием в палеозое эвапоритовых фаций галит-карналлитовой стадий галогенеза, при которых концентрация Br^- в жидкой фазе достигает 3–5 г/дм^3 и более. В нормальной морской воде количество Br^- составляет 65 мг/дм^3 . В серпуховском солеродном палеоводоеме сгущение морской воды достигало только начальной гипсовой стадии, когда содержание Br^- было < 300 мг/дм^3 . Примерно такое же количество Br^- , как указывалось, содержится в рассолах Колвинской структуры ниже серпуховских ангидритов. В самих ангидритах скважиной 3 Яреюской площади на глубине 2.5 км были вскрыты рассолы с M 130–139 г/дм^3 , $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 0,79–0,82, Cl/Br 271–328 (Br 252–285 мг/дм^3), что отвечает экспериментальным данным по сгущению морской воды.

Br^- обнаруживает положительную связь с Ca^{2+} (рис. 6), что объясняется его геохимической устойчивостью при метаморфизации Cl-Mg-Na рассолов в Cl-Ca-Na . Иначе говоря, в результате ионообменных реакций Br^- приобретает связь с Ca^{2+} , ранее (в морских водах и продуктах их сгущения) принадлежавшую Mg^{2+} .

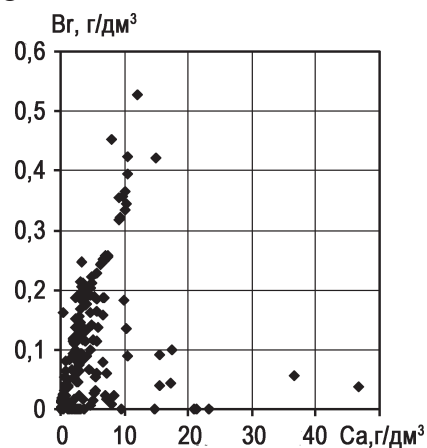


Рис. 6. Связь между бромом и кальцием в подземных водах

Величина отношения Cl/Br – одного из наиболее информативных показателей генезиса рассолов – с глубиной имеет тенденцию к уменьшению от 500 до 150, что отражает постепенное замещение инфильтрационных вод седиментогенными. В большинстве слу-

чаев величина этого отношения близка к 300, что указывает на морское происхождение вод. В первую очередь это относится к верхнепермско-нижнетриасовому ВК и верхней части визейско-артинского ВК. Не противоречит заключению о талассогенной природе вод этих комплексов и величина коэффициента $r_{\text{Na}/r_{\text{Cl}}}$ (0.85–0.87), свойственная морской воде.

Высокие величины отношения Cl/Br (< 500 – 900) при низких концентрациях Br^- (n мг/л) нередко отмечаются у соленых вод и слабых рассолов (M 3–70 г/дм³) нижнепермско-триасового ВК на глубине до 1.7–2.1 км, что указывает на преобладание инфильтрационной составляющей. Судя по этим показателям ($\text{Cl}/\text{Br} \approx 300$, Br^- 10 n мг/л), среди них есть морские воды, а также продукты их разубоживания и сгущения.

Гидрогеохимической спецификой Колвинского вала является и то, что самые низкие значения отношения $r_{\text{Na}/r_{\text{Cl}}}$ (0.6–0.1) свойственны отнюдь не самым крепким и глубоководозалегающим рассолам. Напротив, они характерны для слабых рассолов (M 20–60 г/дм³) нижнепермских и триасовых отложений, залегающих на глубине 1.7–2.2 км. Это объясняется особенностями кинетики обменно-адсорбционных процессов в системе «вода–терригенная порода». Ионообменные возможности литифицированных пород на больших глубинах низкие, поэтому обменно-адсорбционные процессы значимы только для маломинерализованных вод и слабых рассолов [5].

Приведенные данные свидетельствуют о сложных процессах формирования вод нижнепермских и триасовых отложений, участия в них кроме морских рассолов поровых растворов глинистых пород и, не исключено, инфильтрационных вод.

Следует еще раз подчеркнуть, что степень метаморфизации глубинных Cl - Ca - Na и Cl - Na рассолов в карбонатных коллекторах девона и нижнего карбона существенно ниже ($r_{\text{Na}/r_{\text{Cl}}}$ 0.7–0.8). В них ответственной за образование Cl - Ca составляющей является не обменная адсорбция, а метасоматическая доломитизация известняков, которая интенсифицируется по мере роста M рассолов и концентрации в них Mg^{2+} .

В позднепалеозойской истории развития региона, как отмечалось выше, отсутствовали эвапоритовые бассейны с крепкими Cl - Mg рассолами. Поэтому гидрогеохимический эффект процессов доломитизации здесь менее значим, чем в Волго-Уральской области [6].

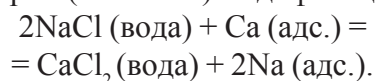
Содержание Γ в меньшей степени, чем Br^- , зависит от M и глубины залегания рассолов. Наиболее обогащены им (20–37 мг/дм³) слабые рассолы (M 60–85 г/дм³) визейско-артинского комплекса Яреюского и Хыльчююского нефтяных месторождений на глубине 2.2–2.3 км. Они отличаются повышенной щелочностью (HCO_3^- до 1–3 г/дм³), восстановительной реакцией среды, способствующих извлечению элемента из органоминеральных соединений пород. Наблюдается положительная связь между Γ и NH_4^+ , который, как и Γ , является продуктом термодеструкции азотсодержащего ОВ. В сильно опресненных глубоководозалегающих рассолах девона и нижнего карбона концентрации Γ снижаются до 2–21 мг/дм³.

Генезис рассолов и соленых вод

Выполненные исследования показали вещественное и генетическое разнообразие рассолов и соленых вод Колвинского вала, образующихся под влиянием различных факторов и литолого-гидрогеохимических процессов в гетерогенной системе «вода–порода». В меловых, триасово-юрских, иногда в нижнепермско-нижнетриасовых терригенных осадках заключены преимущественно соленые (M 5–50 г/дм³) инфильтрационные воды. Они отличаются низкими концентрациями Br^- (1–20 мг/дм³) и сульфат-иона ($r_{\text{SO}_4 \cdot 100/r_{\text{Cl}}}$ 0.1–1.0), высокими значениями отношения Cl/Br (300–890) и по составу относятся к двум геохимическим модификациям: Cl - Na и Cl - Ca - Na .

Чистые Cl - Na воды с величиной отношения $r_{\text{Na}/r_{\text{Cl}}} \approx 1$, соответствующей выщелачиванию галита, имеют ограниченное распространение. Это связано с их низкой M , вследствие чего в результате обменно-адсорбционных процессов в глинистых породах

они подвержены сильной метаморфизации в воды второй (Cl-Ca-Na) модификации:



Так, являясь по своей генетической сути инфильтрационными, Cl-Na воды приобрели хлоркальциевый облик, свойственный седиментогенным рассолам. Переход в поглощенное состояние гидратированного Na^+ неизбежно вызывает уменьшение величины отношения $r\text{Na}/r\text{Cl}$ (0.8...0.2) и рост содержания CaCl_2 (до 50%). Столь высокая степень метаморфизации редко наблюдается даже у эпигенетических седиментогенных рассолов. Идентифицировать эту гидрогеохимическую модификацию с инфильтрогенными водами позволяют низкая М и, главное, высокие значения коэффициента Cl/Br (< 400–500). Среди инфильтрогенных Cl-Na вод не встречаются крепкие рассолы по причине отсутствия в породах галитов – твердой фазы галогенеза.

В контексте с обсуждаемым вопросом надо отметить, что в Большеземельском бассейне воды хлоркальциевого типа широко распространены даже в гидрогеодинамически открытых, заведомо инфильтрационных системах верхнего триаса–юры. Поэтому в существующей литолого-гидрогеохимической обстановке присутствие в водах CaCl_2 и низкие значения отношения $r\text{Na}/r\text{Cl}$ сами по себе не являются критериями седиментационного происхождения вод. В этом отношении заслуживает внимания график, иллюстрирующий обратный характер связи между отношениями $r\text{Na}/r\text{Cl}$ и Cl/Br (рис. 7).

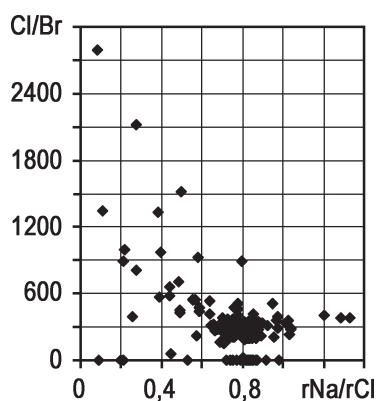
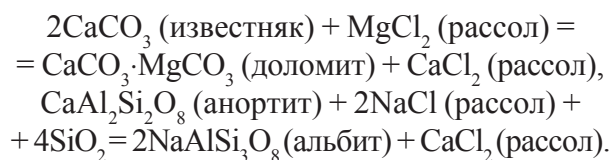


Рис. 7. Связь между величинами отношений $r\text{Na}/r\text{Cl}$ и Cl/Br

В рассолах древних платформ с эвапоритовыми формациями зависимость между этими показателями прямая. Отсюда следует, что при генетической диагностике соленых вод и слабых рассолов Печорской синеклизы коэффициент Cl/Br более информативен, чем отношение $r\text{Na}/r\text{Cl}$. Это объясняется большей геохимической устойчивостью (консервативностью) в растворе Br^- по сравнению с Na^+ . В отличие от Na^+ , Br^- не образует собственных минералов при испарительном концентрировании морской воды, не подвержен комплексообразованию и не участвует в обменно-адсорбционных процессах.

В пермско-нижнетриасовых и артинских отложениях обнаружены погребенные таласогенные воды. Характерными чертами их служат близкие к морской воде величины отношений Cl/Br (250–330, в среднем около 300) и $r\text{Na}/r\text{Cl}$ (0.6–0.9), М 20–60 г/дм³. В этой генетической категории также выделяются две геохимические модификации: Cl-Na ($r\text{Na}/r\text{Cl}$ 0.8–0.9) и Cl-Ca-Na ($r\text{Na}/r\text{Cl}$ 0.6–0.8). Первая – это не претерпевшая существенных эпигенетических изменений захороненная морская вода, а вторая – продукт ее метаморфизации по обменно-адсорбционному механизму. Воды последней от близких по общему ионно-солевому составу инфильтрогенных вод отличаются прежде всего величиной отношения $\text{Cl}/\text{Br} \approx 300$.

В нижней части визейского и верхней части верхнедевонско-турнейского ВК на глубине 2.2–2.8 км залегают Cl-Ca-Na (Na) рассолы с М до 150–200 г/дм³. Они отличаются умеренной метаморфизацией ($r\text{Na}/r\text{Cl}$ 0.7–0.8, CaCl_2 15–20%, редко более), низкими значениями коэффициента Cl/Br (310–150) и высокими $r\text{SO}_4 \cdot 100/r\text{Cl}$ (1–3). Формирование этих седиментогенно-эпигенетических рассолов связано с процессами плотностной конвекции Cl-Mg-Na маточной рапы серпуховского солеродного палеобассейна в подстилающие терригенно-карбонатные породы палеозоя и метаморфизации за счет процессов доломитизации известняков и альбитизации алюмосиликатов, подробно рассмотренных в [5, 6]:



Особый интерес вызывают глубокозалегающие опресненные Cl-Ca-Na и Cl-Na рассолы (M 100–36 г/дм³) и соленые воды (M 36–14 г/дм³) хлоркальциевого типа среднедевонско-турнейского карбонатного нефтегазоносного ВК, создающие геохимическую инверсию в гидростратисфере. Как отмечалось [4], глубина, с которой начинается опреснение рассолов, увеличивается от южных площадей (2.0–2.3 км – Возейская и Усинская) к центральным (3.0 км – Харъягинская) и северным (3.8 км – Яреюская и Хыльчююская). В этом же направлении происходит и погружение фундамента от 4.4 до 9.0 км. Природа этого явления дискуссионна.

Одни исследователи [7] допускали образование на контакте с нефтяной залежью оторочки солюционных вод, другие [8] наличие опресненных рассолов объясняли техногенными явлениями, сопутствующими бурению скважин. Учитывая, что гидрогеохимическая инверсия с разной интенсивностью проявляется на всех месторождениях Колвинского вала, на определенных глубинах и расстояниях от фундамента, она, несомненно, имеет естественное происхождение. Подобные гидрогеохимические феномены известны и в других геологических структурах востока Русской плиты. В частности, обнаружены они в франско-турнейском нефтегазоносном комплексе, расположенной к югу Соликамской депрессии [9].

Мощный осадочный чехол, геотектонические и физико-химические условия Колвинского вала (T на фундаменте – 140–180°C, $P > 50$ МПа) служат необходимыми условиями образования конденсатогенных вод. Судя по всему, сопряженные процессы генерации УВ газов и дистилляции воды из пластовых рассолов протекают на глубине до 7–9 км в ордовикско-силурийских отложениях. Водородные парогазовые флюиды по зонам разломов перемещаются на глубину 2–4 км в экранированный толщей визейских глин девон-

ско-турнейский ВК, где в результате снижения PT параметров происходит образование скоплений УВ и конденсатогенных вод. Относительно короткие пути миграции (тысячи метров) и высокие скорости движения парогазовых смесей, определяющие темпы снижения T и интенсивность выделения свободной воды из УВ, препятствуют диффузионному и конвекционному рассеянию флюида.

Механизм формирования конденсатогенных вод и последующие процессы взаимодействия с пластовыми рассолами и породами объясняют геохимическую специфику образующихся промежуточных водных смесей: низкие M , концентрации Br^- , I^- и др.

Под зоной опреснения M вновь возрастает, и инверсионный гидрогеохимический разрез преобразуется в сложный (см. рис. 4). На это указывает наличие Cl-Ca-Na рассолов с M 234 г/дм³, концентрациями Br^- до 1027, I^- до 22 мг/дм³ на глубинах 3.0–4.5 км в ордовикско-нижнедевонских отложениях Возейской площади и соседних с Колвинским валом структурах Ижма-Печорской и Хорейверской впадин [3].

Выполненные исследования указывают на генетическое разнообразие соленых вод и рассолов Колвинского вала. В формировании их важную роль играют процессы метаморфизации, протекающие по механизмам ионообменной адсорбции и абсорбции в седиментационных и инфильтрационных системах гидростратисферы. Спецификой региона является то, что нормальная гидрогеохимическая зональность, свойственная платформенным осадочным бассейнам, здесь оказалась преобразованной в инверсионную вследствие внедрения в среднедевонско-турнейский ВК глубинных парогазовых флюидов из залегающих на байкальском фундаменте осадочных комплексов раннего палеозоя. Сильно опресненные воды в глубоких частях древних (карельских и беломорских) структур представляют собой очень редкое явление. Более свойственно оно киммерийским и альпийским элизионным структурам литостатического и термодегидратационного типов. Анализ инверсионных явлений является задачей одного из новых тео-

ретических направлений современной генетической гидрогеохимии – флюидогеохимии. Выявление и изучение гидрогеохимических инверсий в стратифере, представленных глубинными маломинерализованными водами, важно еще и потому, что с ними пространственно и генетически ассоциируются молодые нефтегазовые залежи.

Литература

1. Запорожцева И.В., Егорова Н.Ю., Горбань В.А. Геотермические критерии нефтегазоносности Печорской плиты // Печорский нефтегазоносный бассейн (критерии перспективной оценки). Сыктывкар: КНЦ УрО АН СССР, 1985. С. 53–62. (Труды Института геологии. Вып. 52).
2. Зытнер Ю.И., Чибисова З.С. Гидрогеологические критерии прогноза нефтегазоносности северных районов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8, № 3. С. 1–19.
3. Региональный палеогидрогеологический анализ условий рудообразования для основных этапов геологического развития Русской платформы

(в рифее – фанерозое) / Е.А. Басков, В.В. Петров, В.Н. Суриков и др. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2001. 166 с.

4. Мильков В.М. Гидрогеологические условия Колвинского мегавала (на примере Харьягинского месторождения) // Печорский нефтегазоносный бассейн (литология, гидрогеология, нефтегазоносность). Сыктывкар: КНЦ УрО АН СССР, 1987. С. 36–41. (Труды Института геологии. Вып. 61).

5. Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф. Ионообменная концепция в генетической гидрогеохимии. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2013. 356 с.

6. Попов В.Г., Носарева С.П. Геохимическая зональность и происхождение рассолов Предуралья. Уфа: Гилем, 2009. 272 с.

7. Кремс А.Я., Вассерман Б.Я., Матвиевская Н.Д. Условия формирования и закономерности размещения залежей нефти и газа. М.: Недра, 1974. 336 с.

8. Подземные воды Европейского Северо-Востока СССР / В.А. Дедеев, Ю.И. Зытнер, Н.Г. Оберман и др. Сыктывкар: Институт геологии КНЦ УрО АН СССР, 1989. 158 с.

9. Попов В.Г. Геохимические особенности и природа инверсии в подземной гидросфере Соликамской впадины // Геохимия. 2003. № 6. С. 641–650.



BRINE GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF THE KOLVA SWELL IN THE PECHORA SYNECLISE

© V.G. Popov¹, R.F. Abdrakhmanov²

¹South-Russian State Polytechnic University,
132, ulitsa Prosveshcheniya, 346428, Novocherkassk, Rostov Region, Russian Federation

²Institute of Geology, Ufa Scientific Centre, RAS,
16/2, ulitsa K. Marksa, 450077, Ufa, Russian Federation

In this paper we consider the hydrogeochemical characteristics of oil and gas fields located in the Kolva Swell. An important role in the hydrogeochemical development of this structure is played by metamorphic processes governed by the mechanisms of ion exchange adsorption and absorption in the sedimentary and infiltration systems of the subsurface stratisphere. The specificity of the region is that the normal hydrogeochemical zonation typical for platform sedimentary basins was inverted here due to the penetration of deep vapour and gas fluid from the Early Paleozoic sedimentary complexes lying on the Baikal basement into the Middle Devonian-Tournaisian aquifer complex. Particular attention is paid to freshened brines of the Middle Devonian-Tournaisian deposits responsible for the geochemical inversion in the subsurface stratisphere. Its nature depends on the processes of water distillation into the hydrocarbon gas phase within Early Paleozoic complexes adjacent to the Baikal basement and subsequent ascending migration and vapour-gas fluid condensation in the zone of low temperature and pressure parameters.

Key words: Kolva Swell, oil and gas fields, hydrogeochemical inversion, condensed waters.

УДК 55(47+57)

**БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ В МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
БАШКИРСКОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ И ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ
ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

© С.Г. Ковалев, С.И. Высоцкий, С.С. Ковалев

Проведенные исследования позволили подразделить все магматические породы, распространенные в пределах Башкирского мегантиклинория и восточной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП), на три группы, к первой из которых относятся дайки, силлы и пластообразные интрузивные тела, генезис которых обусловлен непосредственным плавлением мантийного субстрата, после чего сформировавшийся расплав внедряется в кору, где и застывает, образуя магматические тела разнообразной формы и состава: пикриты, пикродолериты, габбро, габбро-долериты (Юшинский, Шуйдинский, Повальненский, Кургасский, Лапыштинский, Ишлинский, Мисаелгинский и Инзерский комплексы). Ко второй группе относятся эффузивные и интрузивные породы, которые являются результатом дифференциации расплава в промежуточном очаге, то есть расплав, сформировавшийся в результате плавления мантийного субстрата, образует промежуточную камеру, после чего разнообразные по минеральному составу и основности дифференциаты внедряются в верхние этажи коры и либо изливаются на поверхность в виде эффузивных фаций, либо образуют субвулканические интрузивные массивы (Шатакский комплекс). Третья группа представлена самими промежуточными очагами, которые закристаллизовались в коровых условиях, сформировав крупные дифференцированные (расслоенные) плутоны, и все разнообразие пород этих комплексов (ультрабазиты, пироксениты, габбро, граниты) обусловлено процессами внутрикамерной дифференциации (Кусинско-Копанский комплекс).

В статье впервые приводится характеристика благороднометальной (элементы платиновой группы (ЭПГ) и Au) геохимической специализации магматических пород Башкирского мегантиклинория и прилегающей части ВЕП. Идентичность графиков нормализованных содержаний ЭПГ и Au в магматических породах Башкирского мегантиклинория и востока ВЕП свидетельствует о близости процессов образования и общности механизмов формирования благороднометальной геохимической специализации при становлении магматических тел.

Установлено, что специфика благороднометальной геохимической специализации («родиевая аномалия») магматических комплексов Башкирского мегантиклинория и востока ВЕП обусловлена содержанием благородных металлов в сульфидных минералах (пентландите) и имеет «первичную» природу. Вариации содержаний Pt, Pd и Au, характерные для различных разновидностей пород, распространенных в пределах региона, являются результатом их перераспределения при становлении магматических тел и/или преобразовании вторичными процессами.

Ключевые слова: Башкирский мегантиклинорий, Восточно-Европейская платформа, магматические комплексы, элементы платиновой группы, золото, сульфидные минералы.

КОВАЛЕВ Сергей Григорьевич – д.г.-м.н., Институт геологии Уфимского научного центра РАН,
e-mail: kovalev@ufaras.ru

ВЫСОЦКИЙ Сергей Игоревич, Институт геологии Уфимского научного центра РАН,
e-mail: kovalev@ufaras.ru

КОВАЛЕВ Сергей Сергеевич, Институт геологии Уфимского научного центра РАН,
e-mail: kovalev@ufaras.ru

Введение. По геологическому строению территория Южного Урала в обобщенном виде подразделяется на восточную (палеоокеаническую) и западную (палеоконтинентальную) мегазоны. Эти различия формировались на протяжении длительной истории развития региона. В строении восточной мегазоны участвуют структурно-вещественные комплексы, входящие в состав океанических и островодужных формаций, в то время как западные породы представлены преимущественно платформенными осадочными и магматическими образованиями. Особенности геологического строения находят свое выражение и в распространенности благороднометалльных объектов, наибольшее количество и разнообразие которых установлено в восточной мегазоне, где присутствуют практически все типы золоторудных формаций. В западной мегазоне благороднометалльные (золото-сульфидные и золото-кварцевые) месторождения и рудопоявления приурочены к терригенным породам, которые в большинстве случаев прорываются интрузивными телами основного состава. Генетические условия образования этих объектов на сегодняшний день изучены явно недостаточно. Одной из важных нерешенных проблем является вопрос об источнике рудного вещества и механизмах рудогенного минералообразования. В связи с этим было проведено изучение рудогенерирующего потенциала магматических комплексов основного и ультраосновного-основного состава, распространенных в пределах Башкирского мегантиклинория и восточной окраины Восточно-Европейской платформы (ВЕП) как представителей мантийных образований, характеризующих не только геодинамический режим развития территории, но и определяющих металлогеническую специализацию структурно-вещественных комплексов региона.

Методика исследований. Определения платиноидов (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir) и Au были выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) в аналитическом центре ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

Кроме того, содержание благородных (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir и Au) элементов определялось на масс-спектрометрической системе высокого разрешения HR ICP-MS ELEMENT2 (ThermoFinnigan) для мультиэлементного анализа геологического материала (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург).

Геологическая характеристика. Магматические породы Башкирского мегантиклинория более чем на 90% представлены интрузивными телами дайковой и силловой формы, варьирующими по основности от пикритов до кислых, субщелочных и щелочных разновидностей. Эффузивные образования (базальты различной щелочности и риолиты) распространены локально в обрамлении Тараташского «блока» (Навышский комплекс), а также в Машакской и Шатакской палеорифтогенных структурах. Возрастной интервал формирования магматических пород простирается от раннего рифея до венда и палеозоя включительно. Наиболее полная сводка по магматизму всего западного склона Южного Урала приведена в монографии А.А. Алексева [1]. Кроме того, отдельные вопросы магматизма Башкирского мегантиклинория освещены в целом ряде публикаций, вышедших в последнее время [2–12]. В данной работе приводятся авторские материалы по благороднометалльной геохимической специализации магматических комплексов мезопротерозойского возраста, которые представлены: раннерифейские – Навышским трахибазальтовым, Юшинским габбро-долеритовым и Шуйдинским пикродолеритовым комплексами; среднерифейские – Кусинско-Копанским расслоенным комплексом, Повальненским и Кургасским габбро-долеритовыми, Лапыштинским долерит-пикритовым, Ишлинским пикритовым комплексами, а также Шатакским пикрит-базальт-риолитовым и Ахмеровским гранитным комплексами; позднерифейские – Мисаелгинским феррогаббро-долерит-пикритовым и Инзерским габбро-долеритовым комплексами. Кроме того, приводятся данные по магматическим породам восточной окраины ВЕП, охарактеризованным по разрезам скважин (рис. 1).

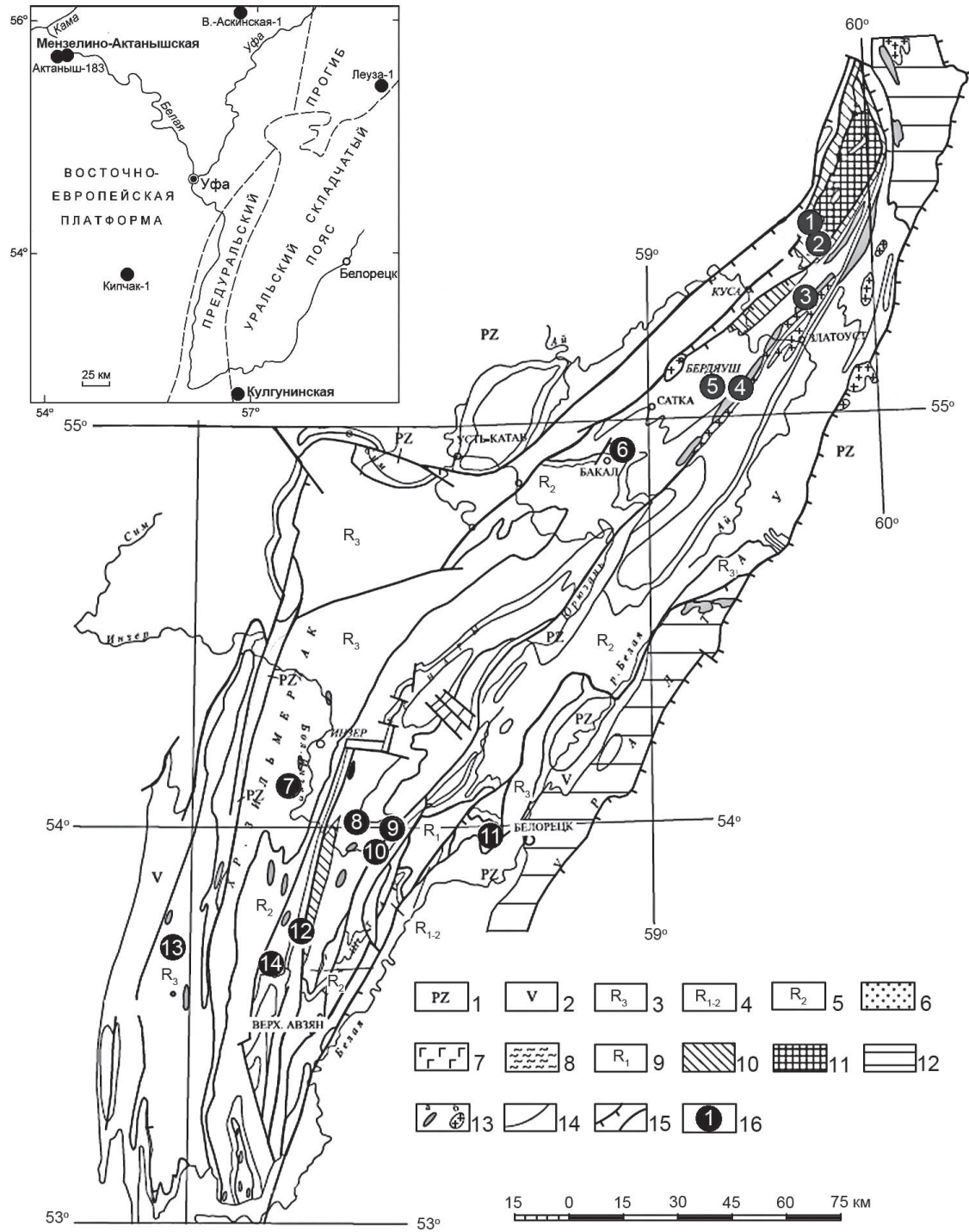


Рис. 1. Геологическая схема западного склона Южного Урала и прилегающей части Восточно-Европейской платформы (на врезке) и положение изученных комплексов: 1 – палеозойские отложения, 2 – вендские комплексы, 3 – отложения верхнего рифея, 4 – породы нижнего–среднего рифея, 5–7 – образования среднего рифея, 8–9 – породы нижнего рифея, 10 – образования айской свиты нижнего рифея, 11 – кристаллические сланцы тараташского комплекса, 12 – метаморфические комплексы Уралтау, 13 – магматические породы: а – основного состава, б – кислого состава, 14 – геологические границы, 15 – разломы, 16 – изученные комплексы (1 – Мисаелгинский, 2 – Лысогорский, 3 – Навышский, 4 – Кусинско-Копанский, 5 – скв. № 7, 6 – Шуйдинский, 7 – Юшинский, 8 – Лапыштинский, 9 – Курманай, 10 – Ишлинский, 11 – Ахмеровский, 12 – Шатакский, 13 – Инзерский, 14 – Повальненский). На врезке показаны скважины, материалы по магматическим породам которых приводятся в данной работе

Предваряя описание благороднометалльной геохимической специализации мезотерозойского магматизма Башкирского мегантиклинория и прилегающей части ВЕП, необходимо акцентировать внимание на следующем. Разнообразии формационных типов магматических пород, присутствующих в регионе, усложняет задачу определения ресурсного (элементы группы платины (ЭПГ) и золото) потенциала этих образований. Вместе с тем классификация магматитов по формационно-петрогенетическим признакам позволяет сконцентрировать внимание именно на тех аспектах, которые необходимы для решения этой задачи. В связи с этим все магматические породы можно подразделить на три группы:

– к первой группе относятся дайки, силы и пластообразные интрузивные тела, генезис которых обусловлен непосредственным плавлением мантийного субстрата, после чего сформировавшийся расплав внедряется в кору, где и застывает, образуя магматические тела разнообразной формы и состава: пикриты, пикродолериты, габбро, габбро-долериты (Юшинский, Шуйдинский, Повальненский, Кургасский, Лапыштинский, Ишлинский, Мисаелгинский и Инзерский комплексы);

– ко второй группе относятся эффузивные и интрузивные породы, которые являются результатом дифференциации расплава в промежуточном очаге, то есть расплав, сформировавшийся в результате плавления мантийного субстрата, образует промежуточную камеру, после чего разнообразные по минеральному составу и основности дифференциаты внедряются в верхние этажи коры и либо изливаются на поверхность в виде эффузивных фаций, либо образуют субвулканические интрузивные массивы (Шатакский комплекс);

– третья группа представлена самими промежуточными очагами, которые закристаллизовались в коровых условиях, сформировав крупные дифференцированные (расслоенные) плутоны и все разнообразие пород этих комплексов (ультрабазиты, пироксениты, габбро, граниты) обусловлено процессами внутрикамерной дифференциации (Кусинско-Копанский комплекс).

Благороднометалльная геохимическая характеристика пород. Элементы группы платины и золото, кроме того, что представляют собой ценные полезные ископаемые, являются информативными геохимическими «маркерами» разнообразных петрогенетических и рудообразующих процессов. Все они обладают сидерофильными свойствами, однако Pt и особенно Pd, а также Au проявляют и халькофильные тенденции. По температурам плавления ЭПГ образуют две триады: легкоплавкие (Pd – 1555°; Pt – 1755°, Rh – 1985°) и тугоплавкие (Ir – 2440°, Ru – 2450°, Os – 2700°), что согласуется с их минералого-геохимическими и металлогенетическими особенностями, а именно: приуроченностью повышенных концентраций самых тугоплавких Os, Ir, Ru к наиболее «высокотемпературным» и, вероятно, глубинным магматическим образованиям, а Rh, Pt, Pd, Au – к промежуточным, с некоторым уменьшением глубинности от Pt к Pd и Au. Кроме того, благородные металлы могут входить в виде изоморфных примесей в оливин, орто- и клинопироксен, хромшпинелид, титаномагнетит, сульфиды и сульфидарсениды Fe, Co, Ni и Cu, образуя замещения по схемам: Pt^{2+} и $Pd^{2+} \rightarrow Fe^{2+}$ и Ni^{2+} ; $Rh^{3+} \rightarrow Fe^{3+}$; $Rh^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$, $Co^{2+} - e$; $Ru^{4+} \rightarrow Fe^{3+} - e$; $Os^{4+} \rightarrow Fe^{3+} - e$; $Pt^{4+} \rightarrow Cr^{3+} - e$; $Pd^{4+} \rightarrow Cr^{3+} - e$ [13].

На рис. 2 изображена серия диаграмм, на которые нанесены средние нормализованные содержания благородных металлов в магматических породах Башкирского мегантиклинория и прилегающей части ВЕП. Анализ диаграмм позволяет охарактеризовать разновременные магматические комплексы и разновидности пород, генезис которых обусловлен различными причинами. Как видно из приведенных графиков, для разновременных пикритовых комплексов характерны общие особенности в строении трендов, а именно, повышенные количества родия и палладия. Причем содержания Rh во всех разновидностях пород превышает количества этого элемента в средних составах пикритов, коматитов и примитивной мантии ~ в 10 раз. Для разновременных пород основного состава (габбро и долеритов) также характерен «ро-

дией» максимум, но в распределении остальных элементов наблюдаются значительные вариации как по отношению к разновозрастным пикритам, так и между собой.

Изменения количеств благородных металлов в разновозрастных габброидах и долеритах, вероятнее всего, обусловлены петрогенетическими условиями образования пород, которые, в свою очередь, зависят от геодинамического режима развития региона. Наличие промежуточных камер, где происхо-

дит дифференциация первичного расплава с одной стороны, и миграция и перераспределение благородных металлов при метаморфизме в коровых условиях – с другой, приводят к «пестроте» в содержаниях ЭПГ и Au. Для магматических пород, вскрытых скважинами в пределах восточной части ВЕП, присущи те же вариации в распределении благородных металлов, что и породам Башкирского мегантиклинория. В частности, тренд, характеризующий пикриты, скв. Восточно-Аскинская

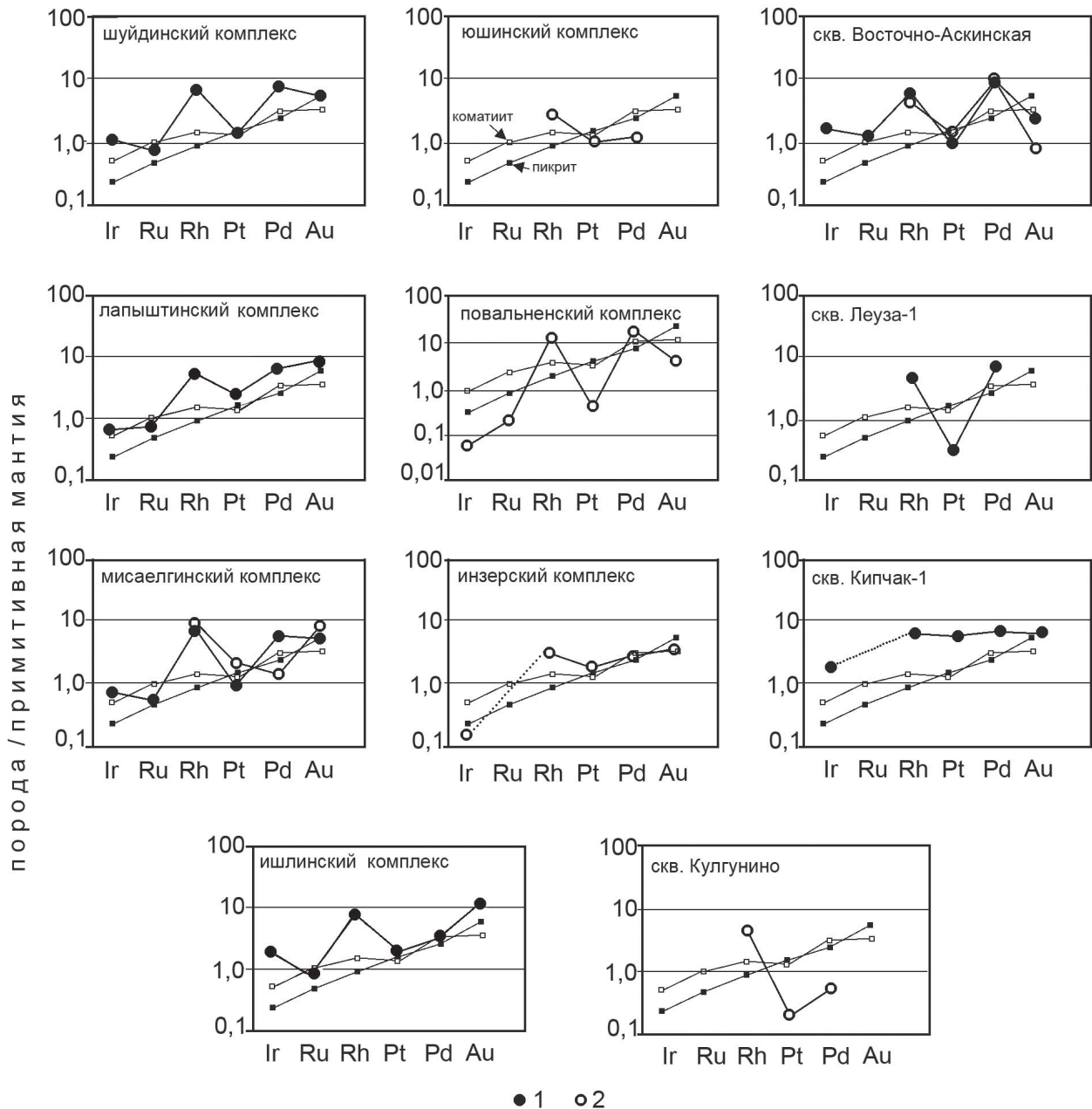


Рис. 2. Средние нормализованные содержания благородных металлов в магматических породах западного склона Южного Урала и прилегающей части ВЕП. Средние составы пикритов и коматиитов по [14]: 1 – пикриты; 2 – долериты

(см. рис. 2), идентичен трендам разновозрастных пикритов западного склона Южного Урала, а нормализованные количества платины, превышающие 1, характерные для долеритов и пикритов скв. Леуза-1 и скв. Кулгунинская, близки к ее содержанию в базитах Повальненского комплекса. «Когерентность» графиков нормализованных содержаний ЭПГ и Au в породах Башкирского мегантиклинория и востока ВЕП свидетельствует о близости процессов их образования и общности механизмов формирования благороднометальной геохимической специализации как в момент становления этих тел, так и при их преобразовании вторичными процессами.

Генетическая природа «родиевой аномалии», присущей практически всем магматическим породам мезопротерозойского возраста, распространенным в пределах Башкирского мегантиклинория и прилегающей части ВЕП, и имеющая относительный характер, устанавливается при анализе материалов, полученных С.Дж. Барнсом и В.Д. Майером [15] по содержаниям платиноидов в сульфидных минералах Норильска (рис. 3). Как видно из приведенных на рис. 3 диаграмм, тренд содержаний ЭПГ в богатых железом сульфидах практически полностью идентичен нормализованным трендам содержаний благородных металлов в разновозрастных пикритовых и пикродолеритовых комплексах Башкирского мегантиклинория и прилегающей части ВЕП, включая Шатакский и Кусинско-Копанский комплексы.

Ранее [16, 17] нами было показано, что основным сульфидным минералом пикритовых комплексов является кобальтсодержащий пентландит, т.е. сульфид, богатый железом, – $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$. Установлено, что сульфидная минерализация присутствует во всех пикритовых комплексах. Наибольшее количество минералов и разнообразие форм их выделения встречаются в глубоко дифференцированных телах. Кроме того, выше было показано, что родий проявляет тенденцию к изоморфным замещениям по схемам: $\text{Rh}^{3-} \rightarrow \text{Fe}^{3-}$; $\text{Rh}^{3-} \rightarrow \text{Fe}^{2-}$, $\text{Co}^{2-} - e$, т.е., он способен замещать

двух- и трехвалентное железо и кобальт в структуре пентландита.

Таким образом, можно с большой долей уверенности утверждать, что специфика благороднометальной геохимической специализации («родиевая аномалия») пикритовых и пикродолеритовых комплексов Башкирского мегантиклинория и востока ВЕП обусловлена содержанием благородных металлов в сульфидных минералах и имеет «первичную» природу, что устанавливается при минералогическом изучении сульфидов и анализе фазовых диаграмм состав-парагенезис системы Fe–Ni–S [16, 17].

Вариации содержаний Pt, Pd и Au, характерные для различных разновидностей пород Шатакского, Кусинско-Копанского комплексов и разновременных базитовых тел, распространенных в пределах региона, вероятнее всего, являются результатом их перераспределения при становлении магматических тел и/или их преобразовании вторичными процессами.

Таким образом, можно констатировать, что благороднометальная геохимическая специализация терригенных пород из тектонических зон Башкирского мегантиклинория (наличие повышенных количеств платиноидов и главное – «родиевая аномалия») обусловлена воздействием на осадочный субстрат магматизма с дальнейшим перераспределением и концентрацией благородных металлов в результате метаморфизма и локального метасоматоза.

Выводы. 1. В результате проведенных исследований впервые охарактеризована благороднометальная (ЭПГ и Au) геохимическая специализация магматических пород Башкирского мегантиклинория и прилегающей части ВЕП. Идентичность графиков нормализованных содержаний ЭПГ и Au в магматических породах Башкирского мегантиклинория и востока ВЕП свидетельствует о близости процессов образования и общности механизмов формирования благороднометальной геохимической специализации при становлении магматических тел.

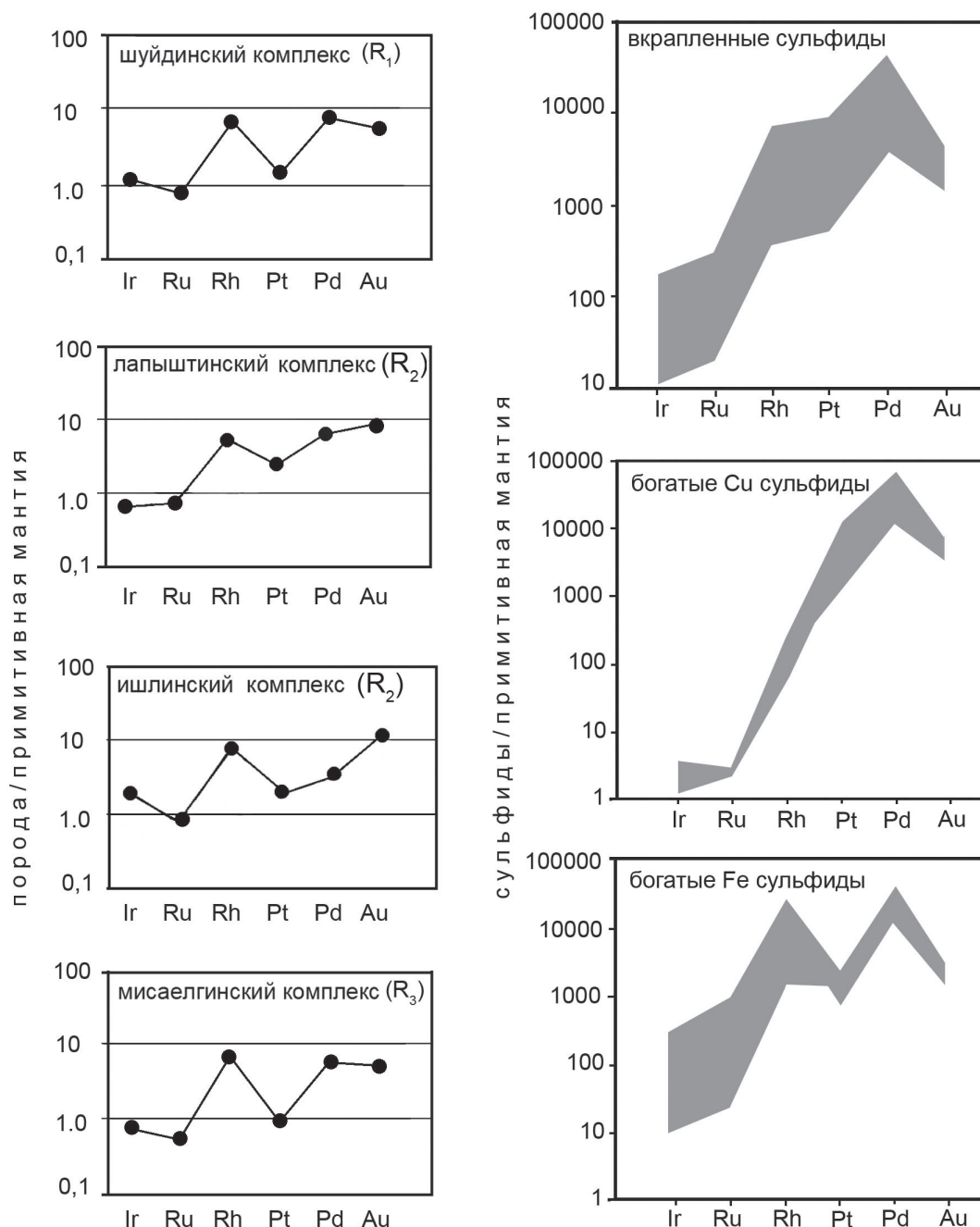


Рис. 3. Средние нормализованные содержания благородных металлов в разновозрастных пикритовых комплексах западного склона Южного Урала и содержания благородных металлов в сульфидных минералах Норильска по [15]

2. Специфика благороднометалльной геохимической специализации («родиевая аномалия») пикритовых и пикродолеритовых комплексов Башкирского мегантиклинория и востока ВЕП обусловлена содержанием благородных металлов в сульфидных минералах (пентландите) и имеет «первичную» природу. Вариации содержаний Pt, Pd и Au,

характерные для различных разновидностей пород Шатакского, Кусинско-Копанского комплексов и разновременных базитовых тел, распространенных в пределах региона, вероятнее всего, являются результатом их перераспределения при становлении магматических тел и/или преобразовании вторичными процессами.

Литература

1. Алексеев А.А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. М.: Наука, 1984. 136 с.
2. Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Прибавкин С.В. Габбро-диабазовые дайки и силлы в ранне-среднерифейских породах Башкирского антиклинория // Ежегодник-2003. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. С. 201–206.
3. Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новый тип оруденения в докембрийских конгломератах западного склона Южного Урала // ДАН. 2004. Т. 395, № 4. С. 503–506.
4. Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 3. С. 280–289.
5. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.
6. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
7. Ковалев С.Г. Позднедокембрийский рифтогенез в истории развития западного склона Южного Урала // Геотектоника. 2008. № 2. С. 68–79.
8. Ковалев С.Г. Новые данные по геохимии диабаз-пикритового магматизма западного склона Южного Урала и условия его формирования // Литосфера. 2011. № 2. С. 68–83.
9. Ковалев С.Г., Высоцкий И.В., Пучков В.Н., Маслов А.В., Гареев Э.З. Геохимическая специализация структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория. Уфа: ДизайнПресс, 2013. 268 с.
10. Сазонова Л.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О., Каргин А.В., Ковалев С.Г. Мезопротерозойские пикриты восточной окраины Восточно-Европейской платформы и Башкирского мегантиклинория: петрогенезис и особенности составов оливина и клинопироксена // Литосфера. 2011. № 3. С. 64–83.
11. Холоднов В. В., Бочарникова Т. Д., Шагалов Е. С. Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд среднерифейского стратифицированного Медведевского массива (Кусинско-Копанский комплекс Южного Урала) // Литосфера. 2012. № 5. С. 145–165.
12. Носова А.А., Сазонова Л.В., Каргин А.В., Ларионова Ю.О., Горожанин В.М., Ковалев С.Г. Мезопротерозойская внутриплитная магматическая провинция Западного Урала: основные петрогенетические типы пород и их происхождение // Петрология. 2012. Т. 20, № 4. С. 392–428.
13. Юшко-Захарова О.Е. Платиноносность рудных месторождений. М.: Недра, 1975. 247 с.
14. Barnes S.J. and Lightfoot P.C. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and affecting their copper and platinum-group element contents // Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. P. 179–213.
15. Barnes S.-J., Maier W.D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids // C.E.G. Geological Association of Canada. Short Course. 1999. 13. P. 69–106.
16. Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Пиндюрина Е.О., Котляров В.А. Сульфидная минерализация пикритовых и пикродолеритовых комплексов Южного Урала // Записки РМО. 2014. № 5. С. 74–84.
17. Ковалев С.Г., Пучков В. Н., Ковалев С.С. Первые находки зигенита (CoNi₂S₄) в пикритовых и пикродолеритовых комплексах Южного Урала // ДАН. 2014. Т. 457, № 3. С. 308–314.

NOBLE METALS IN MAGMATIC COMPLEXES OF THE BASHKIR MEGANTICLINORIUM AND THE EASTERN PART OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM

© S.G. Kovalev, S.I. Vysotsky, S.S. Kovalev

Institute of Geology, Ufa Scientific Centre, RAS,
16/2, ulitsa K. Marksa, 450077, Ufa, Russian Federation

The research made it possible for us to subdivide all igneous rocks occurred within the Bashkir Meganticlinorium and the eastern part of the East European Platform (EEP) into three groups. The first group includes dykes, sills and layered intrusive bodies, whose genesis is caused by direct melting of the mantle substrate and further intrusion of the resultant melt into the crust, where it solidifies to form igneous bodies of various shape and composition:

picrites, picrodolerites, gabbros, gabbro-dolerites (Yusha, Shuyda, Povalnaya, Kurgas, Lapyshya, Ishly, Misa-Elga and Inzer complexes). The second group includes extrusive and intrusive rocks resulting from the differentiation of the melt in the intermediate centre, that is, the melt generated by melting of the mantle material forms an intermediate chamber; then these differentiates of various mineral composition and basicity intrude into the crust upper layers and either pour out onto the surface as volcanic facies or form subvolcanic intrusive bodies (Shatak complex). The third group is represented by intermediate chambers themselves, which were crystallized under crustal conditions and formed large differentiated (layered) plutons. Thus, the whole variety of rocks in these complexes (ultrabasites, pyroxenites, gabbros, granites) is determined by the processes of intra-chamber differentiation (Kusa-Kopan complex).

For the first time, the paper gives the characteristics of noble metal (platinum group elements (PGE) and Au) geochemical specialization of magmatic rocks in the Bashkir Meganticlinorium and the adjacent part of the EEP. The identity of the PGE and Au normalized patterns in igneous rocks of the Bashkir Meganticlinorium and the eastern part of the EEP attests to the similarity of formation processes and mechanisms of the noble metal geochemical specialization when producing magmatic bodies.

It has been revealed that specific precious metal geochemical specialization (“rhodium anomaly”) of the magmatic complexes of the Bashkir Meganticlinorium and the eastern part of the EEP is determined by the content of precious metals in sulphide minerals (pentlandite) and is of “primary” nature. Variations in the Pt, Pd and Au contents are typical for different rock types spread within the region and result from their redistribution during the formation of magmatic bodies and/or transformation by secondary processes.

Key words: Bashkir Meganticlinorium, East European Platform, magmatic complexes, platinum group elements, gold, sulphide minerals.

УДК 553.491+553.41

**ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ ЗОЛОТА В УГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦАХ
АМУРСКОГО СТРАТИФОРМНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

© М.В. Сначёв, А.В. Сначёв

Кратко рассмотрено геологическое строение Амурского стратиформного месторождения. На основе термического метода изучения рудовмещающих углеродистых сланцев построена карта изолиний значений температур преобразования пород в пределах геологического отвода. Это позволило привязать золоторудную минерализацию к определенному температурному интервалу и дало возможность с минимальными затратами оценить перспективы углеродистых отложений на золото. Подсчитаны прогнозные ресурсы золота в углеродистых сланцах флишоидной толщи.

Ключевые слова: Амурское месторождение, углеродистые сланцы, термический метод, золото, прогнозные ресурсы.

Амурское стратиформное цинковое месторождение расположено в крайней восточной части Магнитогорской мегазоны в 1.0–1.5 км западнее крупного Суундукского гранитного массива и приурочено к западному крылу меридионально вытянутой брахиантиклинальной складки (рис. 1). В геологическом разрезе месторождения выделяются две толщи (снизу вверх): рудовмещающая терригенно-сланцево-карбонатная (флишоидная) (D_{2-3}) и вулканогенная (C_1).

Образования **вулканогенной толщи** развиты в западной части площади месторождения, где они представлены преимущественно туфами, туффитами и субщелочными высокотитанистыми базальтами, прорванными дайками и силлами габбро и габбро-диабазов. Породы метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации с локальными проявлениями более высокотемпературной ступени метаморфизма в восточной, наиболее приближенной к Суундукскому массиву части участка месторождения.

Отложения **терригенно-сланцево-карбонатной толщи** развиты в центральной части участка и представлены ритмично переслаи-

вающимися алевролитами, глинистыми, углеродисто-глинистыми, кремнисто-глинистыми, известково-глинистыми, биотитовыми и кварц-полевошпат-биотитовыми сланцами и известняками (рис. 2). Общая мощность вскрытых отложений около 850 м. По находкам амфибор она датируется не моложе позднефранского подъяруса [1]. Находки криноидей в рудовмещающей (флишоидной) толще позволили отнести ее предположительно к силуру–среднему девону [2]. По аналогии с более северными районами возраст толщи принимается нами как средне-верхнедевонский.

На контакте отложений терригенно-сланцево-карбонатной толщи с перекрывающими образованиями вулканогенной толщи отмечается довольно мощная зона дробления и рассланцевания, которая сопровождается линейными корами выветривания, проникающими на глубины до 250 м.

Имея дело с углеродистыми образованиями, необходимо сразу остановиться на содержании в них органического углерода. Так как средние значения $C_{орг}$ в современных морских отложениях меньше 1%, то это значение рекомендуется принимать как пограничное

СНАЧЁВ Михаил Владимирович, Департамент геологии и разработки новых активов ООО «Газпромнефть НТЦ», e-mail: Snachev@yandex.ru

СНАЧЁВ Александр Владимирович – к.г.-м.н., Институт геологии Уфимского научного центра РАН, e-mail: SAVant@rambler.ru

между углеродистыми и неуглеродистыми отложениями [3].

Рассмотрение петрогеохимических особенностей углеродистых отложений Амурского месторождения показывает, что они являются низкоуглеродистыми (содержания органического углерода составляют от 0.88 до 2.80%) и в основной своей массе относятся к карбонатно-углеродистой и терригенно-углеродистой формации. Повышенные значения CO_2 и параметра $C=CaO+MgO$ (среднее 5.87) для углеродистых сланцев, наличие известняков в разрезе и известковистых скелетов криноидей в осадках свидетельствуют о накоплении их в пределах мелководного бассейна [4].

Определения золота в штучных образцах выполнены в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН атомно-абсорбционным методом с химико-спектральным окончанием и с термическим атомизатором. Нижние пределы количественных определений элемента – 0.0005 г/т. Результаты 30 проб представлены в табл. 1. Кларковые содержания золота в углеродистых отложениях мира, оцененные разными способами, составляют 0.008–0.01 г/т [3], аномальными можно считать содержания в 20–35 мг/т, сильной аномалией – 35–50 мг/т, рудогенной аномалией – >50 мг/т. Основным минералом – концентратом золота в породах черносланцевых толщ – является пирит.

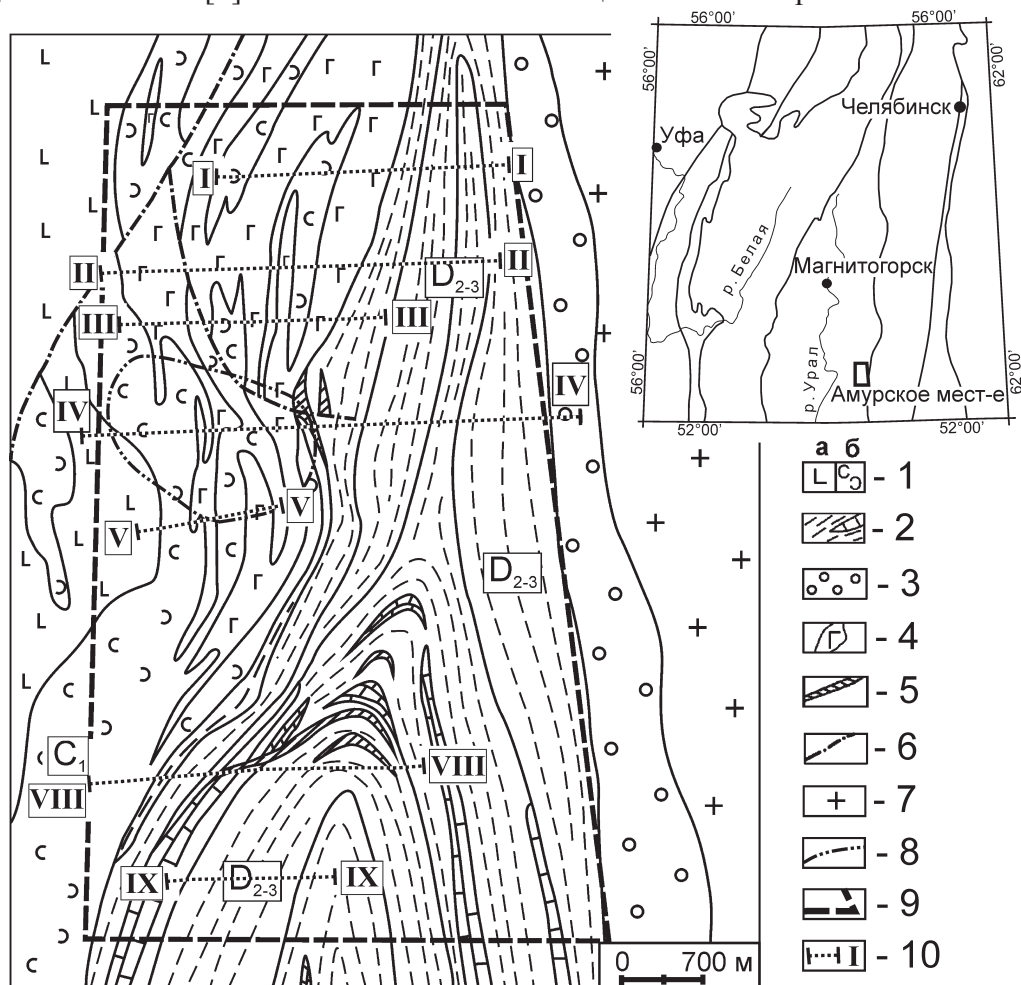


Рис. 1. Геологическая карта Амурского месторождения (составлена А.Д. Штейнбергом в 1976 г.). Условные обозначения: 1 – вулканогенная толща (C₂): базальты и андезибазальты (а), туфы и туффиты основного состава (б); 2 – флишоидная толща (D_{2,3}): углеродисто-глинистые, углеродисто-глинисто-известковистые сланцы, мраморизованные известняки; 3 – полимиктовые песчаники рымникской свиты (O); 4 – габбро, габбро-диабазы; 5 – рудные тела; 6 – разломы и зоны рассланцевания; 7 – граниты; 8 – проекция рудного тела на поверхность; 9 – контур геологического отвода; 10 – поисковые профили 2007–2008 гг. и их номер

Содержания золота в итүфных пробах углеродистой толщи

№ п/п	№ пробы	Au, г/т	№ п/п	№ пробы	Au, г/т
1	AM-4/77	0.1	16	AM-69/421	1.79
2	AM-9/187	1.65	17	AM-69/589	0.022
3	AM-9/341	0.11	18	AM-70/481	0.006
4	AM-15/139	0.053	19	AM-71/432	<0.0005
5	AM-15/222	0.12	20	AM-73/290	0.026
6	AM-19/245	0.096	21	AM-74/209	0.053
7	AM-50/593	3.19	22	AM-75/156	0.099
8	AM-50/596	0.12	23	AM-76/494	0.091
9	AM-55/517	0.061	24	AM-84A/374	0.04
10	AM-56/450	0.18	25	AM-99/170	0.025
11	AM-58/217	0.35	26	AM-102/180	0.19
12	AM-60/598	0.07	27	AM-103/164	0.024
13	AM-62/500	0.025	28	AM-105/247	0.021
14	AM-66/190	0.01	29	AM-105/264	0.01
15	AM-67/121	0.27	30	AM-106/145	0.039

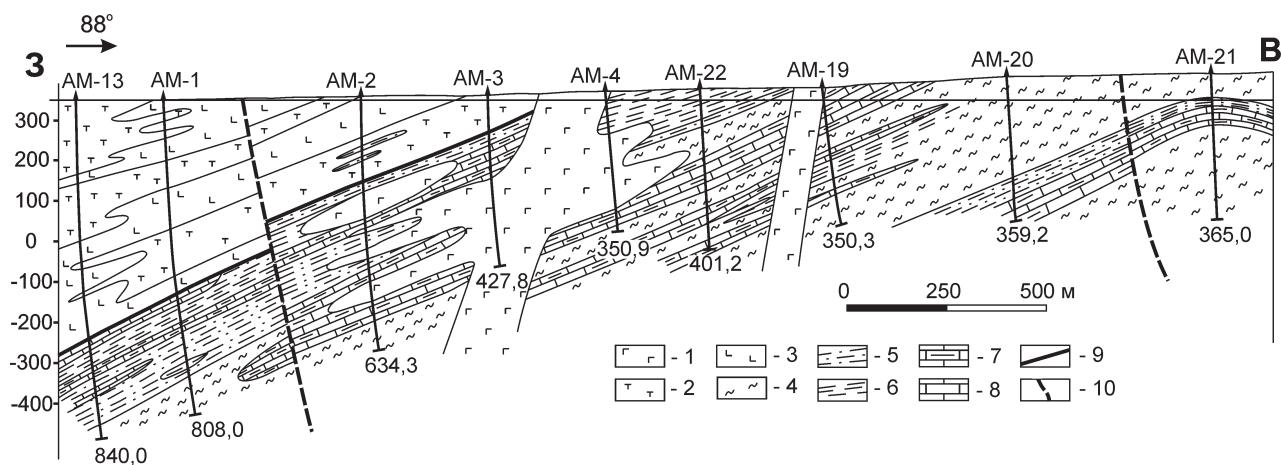


Рис. 2. Геологический разрез по линии II (см. рис. 1) (составлена авторами).

Условные обозначения: 1 – габбро, 2 – туфы, туффиты, 3 – базальты, 4 – глинистые сланцы, 5 – карбонатно-углеродистые сланцы, 6 – кремнисто-углеродистые сланцы, 7 – карбонатные породы с чередованием карбонатно-углеродистых сланцев, 8 – карбонатные породы, 9 – граница флишоидной и вулканогенной толщ, 10 – разломы. Обозначение AM-2/634,3 – номер скважины и ее глубина

Небольшое количество проанализированных проб на данном этапе изучения пока не позволяет выявить рудные зоны с промышленными содержаниями золота, однако полученные данные уже сейчас позволяют говорить о высокой перспективности углеродистых отложений терригенной (флишоидной) толщи [5]. Так, среднее содержание золота в них составляет 0.27 г/т, что в 5 раз выше, чем для рудогенной аномалии. Максимальные же значения концентрации золота в углеродистых сланцах достигают: 3.19 г/т (обр. AM-50/593); 1.79 г/т (обр. AM-69/421); 1.65 г/т (обр. AM-9/187)

и характерны как для восточного, так и для западного флангов месторождения. Более того, если первый и третий образцы принадлежат черным сланцам соответственно рудоносного уровня и перекрывающего горизонта, то второй (обр. AM-69/421) – рассланцованным туффитам вулканогенной толщи с пирит-пиротиновой минерализацией. Это расширяет спектр пород, перспективных на золото, и позволяет надеяться на выявление золотоносных уровней не только среди углеродистых образований, но и вулканогенных пород интенсивно рассланцованных и сульфидизированных,

что характерно для границы раздела вулканогенной и флишоидной толщ. Примечательно, что практически все аномально высокие значения золота пространственно связаны либо непосредственно с участком Амурского месторождения, либо с северо-восточным, наиболее перспективным на цинк его флангом (скв. 9). Ни одна другая поисковая скважина, кроме № 32, расположенной на крайнем востоке геологического отвода, не показала высоких содержаний золота (0.29 г/т) в углеродистых отложениях. Это еще раз указывает на приуроченность золоторудной минерализации к локальным депрессиям в пределах мелководной шельфовой части водного бассейна.

Отметим и другой очень важный момент. Известно, что в процессе кристаллизации гранитоидных массивов по их периферии создается термоградиентное тепловое поле, которое способно вызвать перераспределение золота в углеродистых отложениях, изначально содержащих повышенные его концентрации [6–8]. В этой связи очень важным является выяснение здесь как локальных, так и более крупных региональных критериев прогнозирования золотого оруденения.

С этой целью ранее нами проводились подобные работы в пределах Ларинского и Белорецкого метаморфических куполов, по периферии которых углеродистые отложения пользуются широким развитием [9, 10]. Опробование на золото сульфидизированных и окварцованных кремнисто-углеродистых отложений в их обрамлении позволило выявить четкую закономерность размещения повышенных содержаний золота – все точки с промышленными его значениями укладываются в область развития пород с зеленосланцевой фацией метаморфизма. Наиболее значимые его содержания приурочены к внешней высокотемпературной субфации зеленосланцевой фации.

Примечательно, что в пределах амфиболитовой фации нет ни одной точки с содержанием золота выше 0.1 г/т. Все они имеют значения данного металла либо в области сотых долей грамма на тонну, либо в районе чувствительности метода. Это указывает на существенный вынос золота из пород непосредственного обрамления

Ларинского и Белорецкого гранито-гнейсовых куполов и подтверждает правильность разрабатываемой нами [11, 12] модели метаморфогенно-гидротермального золотообразования в черносланцевых толщах Южного Урала.

Обратимся к Амурскому стратиформному цинковому месторождению, приуроченному преимущественно к углеродистым сланцам девонского возраста и расположенному в непосредственной близости от Суундукского гранитного массива, что создало дополнительные положительные предпосылки для выявления здесь в углеродистых отложениях золотого оруденения, испытавшего в процессе контактового метаморфизма мобилизацию, перераспределение и переотложение.

Породы рудовмещающей флишоидной толщи метаморфизованы в условиях альбит-эпидот-биотитовой субфации зеленосланцевой фации с локальным проявлением в крайней восточной части месторождения более высокотемпературной амфиболитовой фации.

Нами в пределах геологического отвода Амурского месторождения с помощью термогравиметрического анализа углеродистых сланцев флишоидной толщи была получена карта изолиний экзотермического эффекта.

Термогравиметрический анализ углеродистых сланцев проводился на дериватографе Q-1500 (Венгрия) (аналитик Т.И. Черникова, ИГ УНЦ РАН). Нагрев осуществлялся на воздухе от 20 до 1000°C со скоростью 10°C/мин. Для анализа отбирались образцы наименее измененных пород за пределами зон интрузивных экзоконтактов и интенсивной тектонической переработки, что позволило исключить их влияние и реконструировать степень именно регионального метаморфизма.

Для сланцев флишоидной толщи экзотермический эффект происходит в диапазоне 630–730°C, что реально соответствует температурам 550–660°C и биотит-мусковитовому (фация зеленых сланцев) и близок к ставролит-андалузит-биотитовому уровню метаморфизма (эпидот-амфиболитовая фация) [13] (табл. 2, 3).

Следует отметить, что больший интерес представляют не абсолютные цифры, а распределение температур по площади. Постро-

Соотношение уровней катагенеза и регионального метаморфизма пород со стадиями преобразования органического вещества [14]

Стадии катагенеза и регионального метаморфизма осадков	Температура выгорания $C_{орг}$, °C	Стадии углефикации и метаморфизма $C_{орг}$
Катагенез (глубинный диагенез)	до 250	Буроугольная
Катагенез и начальные стадии метаморфизма	250–530 540–560	Каменноугольная Шунгитовая
Фация зеленых сланцев	560–660	Графитовая
Эпидот-амфиболитовая фация	660–700	– // –
Амфиболитовая фация	700–800	– // –
Гранулитовая фация	840–860	– // –

Т а б л и ц а 3

Температура начала выгорания и содержание органического углерода в сланцах флишоидной толщи по результатам термического анализа

№ п/п	№ пробы	Δt , °C	$C_{орг}$, %	№ п/п	№ пробы	Δt , °C	$C_{орг}$, %
1	АМ-15/109	715	1.0	12	АМ-33/160	730	2.1
2	АМ-15/114	720	0.7	13	АМ-34/263	660	0.4
3	АМ-15/118	710	0.8	14	АМ-34/349.7	620	1.2
4	АМ-15/124	680	0.8	15	АМ-38/139.7	730	1.8
5	АМ-16/261	715	1.1	16	АМ-38/229	720	1.4
6	АМ-16/263.5	710	1.2	17	АМ-38/229	720	1.4
7	АМ-16/288	720	1.6	18	АМ-38/274	760	0.6
8	АМ-26/86.3	680	1.2	19	АМ-41/49.8	660	2.7
9	АМ-31/108.4	680	2.3	20	АМ-41/67.9	710	0.8
10	АМ-33/102.3	740	1.5	21	АМ-42/314.2	690	0.6
11	АМ-33/130.9	725	1.7				

ение карты изолиний значений температур экзотермического эффекта позволяет по результатам термогравиметрического анализа выделить зоны с различной степенью метаморфических преобразований (рис. 3).

Область эпидот-амфиболитовой субфации зеленосланцевой фации, наиболее перспективная на поиски золоторудной минерализации, занимает, как это следует из рис. 3, северо-западную часть геологического отвода. Именно она была использована нами при подсчете прогнозных ресурсов золота по категории P_2 .

При прогнозе ресурсов отдельных рудных тел, месторождений и продуктивных образований по категории P_1 и P_2 можно использовать формулу [15]:

$$Q = k \times S \times H \times C \times D,$$

где Q – прогнозные ресурсы компонента или руды, t ; S – предполагаемая площадь распро-

странения оруденения на некотором горизонте (например, площадь выхода на дневную поверхность), m^2 ; H – экстраполируемая глубина распространения оруденения (глубина прогнозирования), m ; C – содержание компонента в руде, удельная продуктивность или коэффициент рудоносности (содержание руды в продуктивных образованиях, t/m); D – средняя плотность пород объектов, t/m^3 ; k – коэффициент надежности прогноза; его значения принимаются на основании экспертной оценки ($k=0.3-0.5$ при низкой, $0.5-0.8$ – при высокой, $0.8-1.0$ – при очень высокой достоверности данных).

Исходные данные для подсчета ресурсов по категории P_2 следующие:

1. Предполагаемая площадь развития оруденения соответствует таковой двух палеодепрессий, в пределах которых накапливались уг-

леродистые отложения с пирит-сфалеритовым и благородным оруденением (участки Амурского месторождения и к северо-востоку от него) и ограниченных изолинией температуры экзотермического эффекта в 700°C , составляют 1.4 км^2 (S).

2. Расчет средней мощности минерализованного уровня в углеродистых сланцах на данном объекте не представляется возможным в силу отсутствия значимых результатов на Au в бороздовых пробах. По аналогии с месторождениями кызылкумского типа, к числу которых принадлежит рассматриваемое оруденение [16], а также проявлением Отнурок (Белорецкий купол) [10], нами параметр H принят в размере 3 м.

3. Согласно табл. 1, среднее содержание золота по штуфным пробам (C), отобранным из углеродистых сланцев только в пределах Амурского месторождения и северо-восточного участка (скв. 9, 15 и все оценочные с номерами от 50 и более), составляет 0.27 г/т .

4. Средняя плотность углеродистых образований (D) – 2.6 т/м^3 , коэффициент надежности прогноза (k) – 0.7 .

Тогда прогнозные ресурсы золота по категории P_2 составляют 2064 кг .

Таким образом, проведенная работа показывает возможность использования достаточно дешевого термogravиметрического анализа при прогнозе золотого оруденения в метаморфизованных углеродистых толщах. Золоторудные объекты, имея четкую приуроченность к зеленосланцевой фации [17], в большинстве случаев концентрируются вблизи или почти на границе с амфиболитовой фацией метаморфизма, особенно на участках с интенсивно проявленной тектонической активностью [18, 19].

На рассматриваемой нами территории геологического отвода Амурского стратиформного цинкового месторождения, располо-

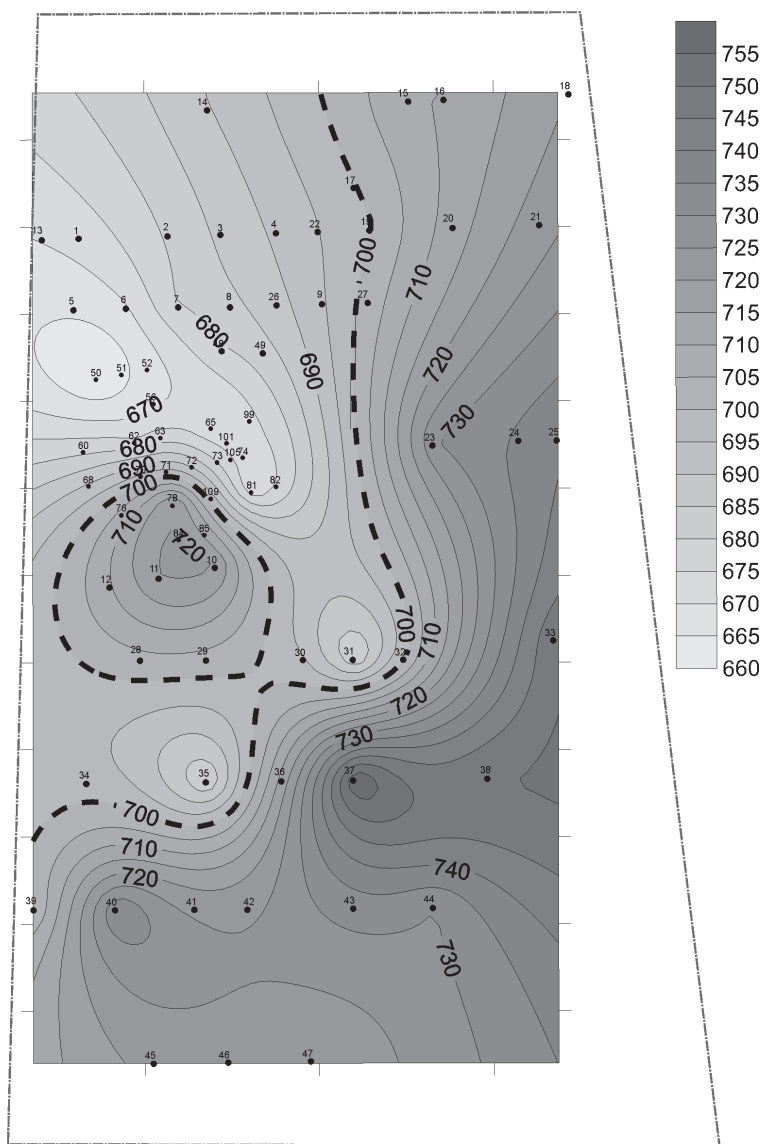


Рис. 3. Карта изолиний (метод интерполяции Kriging) значений температур экзотермического эффекта (ДТА) для кремнисто-углеродистых сланцев в пределах геологического отвода Амурского месторождения.

Пунктирная линия – граница между эпидот-амфиболитовой субфацией зеленосланцевой фации метаморфизма и амфиболитовой, проведенная по изолинии 700°C (реально около $620\text{--}630^{\circ}\text{C}$)

женного в западном обрамлении Суундукского гранитного массива, наиболее перспективным на золото является северо-западный участок, в пределах которого развиты углеродистые отложения рудовмещающей флишидной толщи. Именно он предложен нами ОАО «Челябинский цинковый завод» (обладатель лицензии на Амурское месторождение) в качестве первоочередного для проведения поисковых работ на золото.

Литература

1. Широбокова Т.И., Штейнберг А.Д. Медноколчеданные месторождения Урала: геологические условия размещения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. С. 194–195.
2. Артюшкова О.В., Куриленко А.В., Якупов Р.Р., Маслов В.А., Зианбердин Р.И. Новые данные о возрасте Амурского пирит-сфалеритового медноколчеданного месторождения (Ю. Урал) // Геологический сборник № 6. 2007. С. 38–39.
3. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 271 с.
4. Сначёв А.В. Петрогеохимическая и палеогеографическая характеристика условий осадконакопления углеродистых отложений области сочленения Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазон Южного Урала (широта Суондукского массива) // Известия АН РБ. Геология. 2010. № 15. С. 90–95.
5. Сначёв А.В., Пучков В.Н. Первые находки палладий-золото-редкометалльной минерализации в докембрийских углеродистых сланцах западного склона Южного Урала // Докл. РАН. 2010. Т. 433, № 1. С. 77–80.
6. Демин Ю.И., Золотарев В.Г. Зоны изотермической стабилизации в градиентных полях гранитоидных тел и возможности прогноза выявления в них рудных месторождений // ГРМ. 1980. № 5. С. 3–17.
7. Сначёв В.И., Демин Ю.И., Романовская М.А., Щулькин В.Е. Тепловой режим становления гранитоидных массивов. Уфа: БНЦ Уро АН СССР, 1989. 117 с.
8. Демин Ю.И., Сначёв В.И. Тепловые поля Ахуновского гранитного массива и закономерности размещения в них оруденения // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, №1. С. 152–156.
9. Сначёв А.В., Сначёв В.И. Закономерности размещения золоторудных проявлений в углеродистых отложениях Ларинского купола (Южный Урал) // Руды и металлы. 2013. № 4. С. 18–22.
10. Сначёв В.И., Сначёв А.В. Закономерности размещения золоторудных проявлений в углеродистых отложениях Белорецкого метаморфического комплекса (Южный Урал) // Вестник ВГУ. 2014. № 2. С. 79–87.
11. Сначёв А.В., Савельев Д.Е., Сначёв В.И. Палладий-золото-редкометалльная геохимическая ассоциация в углеродистых сланцах зигазино-комаровской свиты (Южный Урал) // Руды и металлы. 2010. № 4. С. 14–19.
12. Сначёв А.В., Сначёв В.И., Рыкус М.В., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Ардисламов Ф.Р. Геология петрогеохимия и рудоносность углеродистых отложений Южного Урала. Уфа: ДизайнПресс, 2012. 208 с.
13. Блюман Б.А. Дьяконов Ю.С., Красавина Т.Н., Павлов М.Г. Использование термо- и рентгенографических характеристик графита для определения уровня и типа метаморфизма // Зап. Всесоюз. минералог. о-ва. 1974. Ч. 103, вып. 1. С. 95–103.
14. Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розина Е.Л. Термический анализ минералов и горных пород Л.: Недра, 1974. 399 с.
15. Гинзбург А.И., Фельдман Л.Г. Руководство по оценке прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. М.: ВИМС, 1982. 320 с.
16. Гурская Л.И. Платинометальное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 208 с.
17. Сначёв А.В., Рыкус М.В., Сначёв В.И. Благородные металлы в углеродистых отложениях южной части Арамильско-Сухтелинской зоны // Геологический сборник № 3. 2003. С. 180–185.
18. Рыкус М.В., Сначёв В.И. Золото западного склона Южного Урала. Уфа: УНЦ РАН, 1999. 170 с.
19. Ковалев С.Г., Сначёв В.И., Высоцкий И.В., Рыкус М.В. О новом типе благороднометалльной минерализации на западном склоне Южного Урала // Руды и металлы. 1997. № 6. С. 27–33.

INFERRED GOLD RESOURCES IN CARBONACEOUS SHALES OF THE AMUR STRATIFORM DEPOSIT (SOUTH URALS)

© M.V. Snachev¹, A.V. Snachev²

¹Department of Geology and development of new assets OOO “Gazpromneft-NTC”
75–79, CB, g. Moika Embankment, 190000, St. Petersburg, Russian Federation

²Institute of Geology, Ufa Scientific Centre, RAS,
16/2, ulitsa K. Marksa, 450077, Ufa, Russian Federation

The paper provides an overview of the geological structure of the Amur stratiform deposit (South Urals). Using the thermal method to study ore-bearing carbonaceous shales, we constructed a temperature contour map for rocks within the geological allotment. This allowed us to correlate gold mineralization to a certain temperature range and assess the prospects of carbonaceous rocks for gold at minimum cost. The inferred gold resources in carbonaceous shales of the flyschoid unit were calculated.

Key words: Amur deposit, carbonaceous shales, thermal method, gold, inferred resources.

УДК 299.27

МОБИЛИЗОВАННЫЙ АРХАИЗМ: НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ТРАДИЦИОННОЙ РЕЛИГИОЗНОЙ ПРАКТИКЕ ПОКЛОНЕНИЯ БАШКИРСКИХ МУСУЛЬМАН

© А.Б. Юнусова

Фактически архаист всегда занят одним и тем же – примирением Прошлого и Настоящего. В противоречивых претензиях этих двух начал кроется слабость архаизма как образа жизни. Архаист всегда перед дилеммой: либо он уходит в Прошлое, оставляя Настоящее, но тогда броня его убежища не выдерживает натиска Жизни, либо пытается возродить Прошлое через Настоящее, но тогда он скатывается на грань вандализма, ибо в Настоящем черты Прошлого искажены до неузнаваемости.

Арнольд Тойнби. Постижение истории

На основе полевых материалов автора и работ современных башкирских исследователей анализируются новые тенденции в сохранившейся до настоящего времени у башкир-мусульман практике поклонения святым местам, дается краткое описание объектов поклонения на территории Башкортостана.

Ключевые слова: святые места, паломничество, паломнический туризм, целительство, мнимые захоронения, сакрализация археологических памятников.

Общеизвестно, что восприятие башкирами мусульманских морально-этических, правовых и культурных норм не вытеснило из их сознания доисламских обычаев и верований, корни которых уходят в глубокую древность. Их можно обнаружить в топонимике края, в башкирском языке, обрядности и устном народном творчестве. Сохранившиеся среди башкир-мусульман архаичные культы привлекают внимание современных исследователей, которые усматривают в них, с одной стороны, проявления способности ислама адаптироваться к местным социокультурным реалиям, в т.ч. к традициям башкирского родо-племенного общества, с другой, – признаки «народного ислама», характерного для полукочевого в прошлом общества, или особенность именно башкирского ислама, сформировавшегося под влиянием центральноазиатской суфийской традиции [1–5], носителями которой

были ишаны. Наложение исламских норм на местные религиозно-философские представления и культы выразилось в распространении ишанизма, а башкирские ишаны были одновременно и «указными», то есть официально назначенными муллами.

Распространение ишанизма среди башкир в значительной степени обусловило то, что Оренбургские степи в XVIII–XIX вв. представляли собой своеобразную транзитную территорию для жителей Центральной Азии, стремившихся через Россию – Оренбургскую и Астраханскую губернии – попасть в Мекку. Учитывая многочисленность азиатских паломников, и среди них дервишей, признанных правительством «не совсем полезными», в 1819 г. был учрежден специальный Азиатский комитет для рассмотрения «всех вообще азиатских дел», а в 1832 г. решением этого Комитета было запрещено пропускать через

ЮНУСОВА Айслу Биаловна – д.и.н., Институт этнологических исследований им. Р.Г. Кузеева Уфимского научного центра РАН, e-mail: aby_02@mail.ru

внутренние российские губернии всех «заграничных азиатов» и отказывать в просьбе дервишей о принятии их в подданство России, «так как подобные с их стороны домогательства – не что иное, как предлог, чтобы иметь возможность оставаться беспрепятственно в наших пределах», при этом они «хотят приобрести доверие своих единоверцев и возможность жить за их счет». Несмотря на действия пограничных администраций, популярность бродячих дервишей в башкирской среде не становилась меньше [6]. Православный богослов XIX в. П.А. Позднев, чье высказывание приводит Ю.В. Гусева, отмечает, что «в Россию *дервишество* проникло из Бухары через последователей Накшибенди, известного основателя дервишеского ордена. А так как в Бухаре дервиши называются «ышанами», то и у нас они более известны под этим именем», подтверждает, что ему лично приходилось видеть ишанов в г. Оренбурге, – их много рассеяно по оренбургским степям между башкирами и киргизами», – пишет он [3, с. 17]. Для башкир-мусульман характерной особенностью стал культ ишанов – почитание их в качестве святых, а могил ишанов – в качестве святых мест, где совершаются поклонения и жертвоприношения.

Культ ишанов был обусловлен приписываемой им способностью творить чудеса (караматы), исцелять, предвидеть будущее. Чудотворные свойства при этом приписывались и атрибутам ишанов-дервишей, важнейшим из которых считался посох, помогавший дервишам перемещаться в пространстве, открывать родники, вызывать дождь, считалось, например, что вода, которой обливали посох, исцеляет от болезней [7, с. 148–153].

Кроме того, ишаны стояли у основания многих центров религиозного образования на Южном Урале, созданные ими медресе были широко известны за пределами Башкирии, медресе ишанов Нигматуллы Биктемирова, Абдул-Хакима Курбангалиева, Хабибназара Сатлыка, Зайнуллы Расулева и другие были точками притяжения мусульман Центральной Азии, Урала, Поволжья, которые стремились получить образование у по-

читаемых наставников. Однако в настоящее время в противоречии с традицией, современные духовные просветители и мусульманские медресе полностью утратили былую привлекательность и ореол святости, которые были важнейшими факторами формирования культа ишанов.

В настоящее время в Башкирии, особенно в южных районах и в Башкирском Зауралье, культ ишанов выражен главным образом почитанием могил, в народной памяти сохраняются также чудеса (караматы) башкирских ишанов-целителей, которые зачастую инсценируются в современной религиозной практике мусульман.

Одним из почитаемых по сей день целителей был башкир Мужавир-хазрат (Сиражетдинов Мужавир Уильданович, 1876–1967 гг.) из д. Мансурово Баймакского района Республики Башкортостан. Лечиться к нему приезжали из Средней Азии, Казахстана, Кавказа и многих других городов нашей страны. По рассказам очевидцев, он излечивал чтением молитв, аятов Корана, оберегами, травами, а больные даже по дороге к нему получали исцеление. Существуют легенды о его караматах, например, он мог внезапно появляться или исчезать, переходить через реку сухим, открывать закрытые замки, останавливать машину и т.д. Там, куда он прикасался рукой, начинал бить родник. После его смерти в 1967 г. три родника были названы его именем. В настоящее время не прекращается паломничество к его могиле больных, жаждущих исцеления, а в д. Мансурово ежегодно в августе проводятся мусульманские съезды в память о Мужавире-хазрате [8, с. 3–4].

Наиболее ярким подтверждением сохранения элементов древних культов в сознании и практике башкир в настоящее время являются паломничества к так называемым «*аулия кабере*» – могилам башкирских святых.

Кэшэне Хусаин-бека стало местом не только паломничества, но и проведения ежегодных народных сходов – мусульманских съездов, посвященных памяти исламского просветителя, на которые собираются тысячи мусульман из Башкирии и соседних реги-



Аулия кабере. Баймакский р-н РБ, 2009. Фото А.Б. Юнусовой

онов. В июле 2013 г. на юбилейном X съезде мусульман Башкирии собралось более 2 тыс. человек, в пос. Чишмы коллективное моление провел Верховный муфтий России Талгат Таджуддин [9, с. 93–95]. Кроме этого кэшэнэ, на территории Башкирии известны еще несколько десятков почитаемых могил «святых»: захоронение у горы Сын-таш, «аулия кабере» с бронзовой плитой в Бирском районе, «аулия кабере» у д. Юз Имянь в Стерлитамакском районе [10, с. 48]. Особенно много их на территории Аургазинского, Давлекановского и Альшеевского районов. По сей день во время мусульманских религиозных праздников жители окрестных деревень приходят к могиле ишана Ягафара, похороненного в 1819 г. возле д. Тимаш (ныне д. Старотимошкино). По преданию, этот ишан получил образование в Стамбуле, служил лекарем и астрологом при дворе турецкого султана, и даже однажды спас от приближающегося шторма корабль турецкого флота, заранее предсказав приближение ненастья. О могиле ишана Ягафара заботятся, регулярно подправляют и красят ограду, ухаживают за деревьями, которые тоже считаются священными (запретными) [11, с. 32].

Еще одна почитаемая могила святого находится на горе Ауш-Таш в Учалинском районе у д. Старобайрамгулово. Над могилой установлен камень с трудно различимым арабским тек-

стом, который позволяет прочесть дату: «651 год во времена Берке-Хана...», что соответствует 1237 г. [12, с. 30]. Возможно, речь идет об одном из миссионеров. Существует версия, что на вершине находятся захоронения 13 человек, и весь комплекс является древним тюркским кладбищем. Гора Ауш как объект поклонения известна по башкирским легендам, до 30-х гг. XX в. башкиры ходили сюда лечиться от всех болезней, практика паломничества к могиле святого возродилась в 90-е гг. XX в., когда священная вершина Ауш-Таш вновь приобрела широкую известность среди мусульман Южного Урала. Ежегодно из Башкирии, Челябинской, Оренбургской областей приезжают тысячи мусульман, чтобы почтить память проповедников ислама, читают молитвы и набирают «святую» воду из ключа Аулия [13]. 21–22 мая 2015 г. участники экспедиции ИЭИ УНЦ РАН зафиксировали более тысячи человек, совершающих восхождение к святому источнику [14].

В первом десятилетии XXI в. самым оживленным местом поклонения стала гора Нарыс-Тау в Миякинском районе с родником Изге Гали у ее подножия. Среди мусульман распространена версия, что это место захоронения «двух сахабов» (сподвижников пророка Мухаммеда), которые якобы прибыли с проповеднической миссией от самого пророка Махаммеда в 30-х гг. VII в. по хиджре. На установленной в июне 2011 г. мемориальной

плите выбиты их имена: Заид бин Зубаиру и его сын Зубаир бин Абдурахман. И хотя историки считают, что на вершине горы находится могила героя башкирского эпоса «Идукай и Мурадым» Идукая (Едигея), героически погибшего в борьбе с войсками хана Туктамышша в XIV в., сюда как на «могилу сахабов» приезжают мусульмане – паломники из Башкирии и Татарии, всей России, а также из соседних государств – Казахстана, Таджикистана, Узбекистана и других стран. В мае 2013 г. «могилу сахабов» посетил турецкий проповедник из Северного Кипра Шейх Мухаммад Назим Адиль аль-Кубруси аль-Хаккани, который внес свою лепту в поддержание имиджа Нарыс-Тау как мусульманской святыни. В 2015 г. Шейх провел «духовные беседы» (сохбаты) в нескольких районах Башкирии, разрекламированные отдельными СМИ, сайтами, духовными лицами, в т.ч. и Верховным муфтием Талгатом Таджуддином на его странице «ВКонтакте». В программе пребывания Шейха в Башкортостане с 1 по 5 мая 2015 г. были запланированы «намаз на горе Нарыс-Тау в мечети Сахабов, зиярат к макаму сахабов пророка Мухаммада (с.г.с.) Зубайра бен Зайда и Абдрахмана бен Зубайра совместно с Верховным муфтием России Шейх-уль-ислам Талгатом Таджуддином (Миякинский район, РБ)», а также зиярат к макаму Аулии на горе Ярыштау в Давлекановском районе, Акшам намаз и сохбет в соборной мечети Уфы, намаз, сохбет в мечети села Аскино, намаз и сохбет в мечети села Старо Казанчи Аскинского района, зиярат к макаму ишана Гарифуллы Киекова, встреча с мусульманами около святого источника, сохбет (Татышлинский район, село Старый Курдым), зиярат к макаму ишана Гали Чокорой в д. Старочукурово Татышлинского района, Акшам-намаз и сохбет в уфимской мечети Ляля-Тюльпан. «Башкирию посетил известный суфийский ученый из Кипра Шейх Мехмет Адиль, – сообщается на сайте, – сын величайшего мусульманского мастера Накшбандийского тариката Мухаммада Назима приехал в республику по приглашению Верховного муфтия России Талгата Сафа Таджуддина уже в третий раз». За четыре дня

своего визита Шейх Мехмет Адиль, который является «наследником Золотой Цепи преемственности Тариката Накшбанди, которая восходит к Пророку Мухаммаду (мир ему)» совершил пятничный намаз на горе Нарыстау в мечети Сахабов, поклонение «макаму сахабов пророка Мухаммада Зубайра бен Зайда и Абдрахмана бен Зубайра», «макаму Аулии» на горе Ярыштау в Давлекановском районе [15].

К особо почитаемым местам относятся также захоронения Зайнуллы Расулева на старомусульманском кладбище в г. Троицке [2, 16]. С 2012 г. в троицком филиале Челябинского государственного университета ежегодно проводится Всероссийская научно-практическая конференция «Расулевские чтения: ислам в истории и современной жизни России» [17], среди участников которой – имамы, ученые, студенты и общественники из Челябинской, Оренбургской и Курганской областей, Башкортостана, Татарстана, Казахстана. О программе конференции – посещение могилы Зайнуллы Расулева, которая стала местом паломничества верующих.

Захоронения первого муфтия России Мухамеджана Гусейнова возле с. Адзитарово в Кармаскалинском районе, могила Риззэтдина Фахретдинова на мусульманском кладбище в Уфе и другие также относятся к местам, почитаемым мусульманами Башкортостана. Почитаемые могилы святых есть в Бижбулякском районе возле д. Кунаккулово, в Ишимбаевском – у д. Старо-Байрамгулово и т.д.

В почитании могил мусульманских святых проявляются древние пласты духовной жизни башкир, когда у каждого рода было свое священное место – камень, скала, вершина горы, роща. Такими древними святынями являются гора Торатау – один из Стерлитамакских шиханов, гора Масимтау, в жертву духу которых башкиры приносили монеты, женские украшения и лоскутки материи, также святыни вблизи Ирдышева озера, где башкиры собирались на коллективные моления в XVII в. [12, с. 32–34].

Если могилы святых широко известны и доступны, то культовые объекты сакральной территории рода, деревни обычно табуиро-

ваны, посещения этих объектов и жертвоприношения носят скрытый характер, а присутствие посторонних считается нежелательным. Об этом еще в XVIII в. упоминал И. Лепехин в своих «Дневных записках», описывая восхождение на шихан Торатау 15 мая 1770 г. с проводниками-башкирами: «В одиннадцати верстах от Стерлитамакской пристани по нагорному берегу реки Белой видна последняя из высочайших гор близ Оренбургской дороги в Уфу, Тура Тау (Городковая гора), прозываемая. ... Башкирцы к горе сей имеют особое почтение и почитают ее за священное место. ... За свято почитаемая башкирцами Тора Тау принудила нас быть роскошными и возбуждать башкирскую неустрашимость, ибо никто из них на сию гору с нами идти не хотел, отговариваясь разными обетами, которые они горе должны, и которые еще не исполнены, ибо без исполнения обетов взлзнуть на гору никто не может, разве кто хочет сам себе быть злодеем». И. Лепехин также пишет, что у башкир считается преступлением брать что-либо у священной горы «без всякой надобности и без обета» [18, с. 31–32].

Посещения почитаемых мест не связаны непосредственно с религиозными обрядами и праздниками, но сам процесс посещения сопровождается мусульманскими молитвами, иногда – чтением Корана. В башкирском Зауралье – Баймакском, Зилаирском, Хайбуллинском районах – почитаемыми культовыми объектами являются многочисленные *караски* – сложенные из камня (валунов или плитняка) пирамиды и колонны, выполнявшие ранее охраняющие функции территории рода – своего рода «стражи». Исследователи З. Аминев и В. Котов считают, что сооружение на вершинах гор караски – один из способов сакрализации освоенного человеком пространства, являющийся отголоском древнего культа гор тюркоязычных предков башкир [19–22]. Возведенные на возвышенных местах, *караски* хорошо видны с дороги, но в горно-лесных районах труднодоступны, а местные жители и сейчас отказываются быть проводниками к ним. При осмотре караски видно, что здесь совершаются жертвоприношения, в каменных

кладках присутствуют остатки золы, обгоревшие кости принесенной в жертву птицы [21].



Караски. Баймакский р-н РБ, 2009. Фото А.Б. Юнусовой

В XVIII–XIX вв. к сооружению караски были причастны жители охраняемой ими деревни, муллы, в т.ч. странствующие дервиши, путники. Сооружаемые в честь духов гор каменные кладки постоянно увеличивались в размерах, поскольку каждый при подъеме на вершину горы должен был прихватить камень и положить в караски. В настоящее время *караски* обычно складывают пастухи, объясняя это традицией – «так делали до них старики» [19, с. 26–28]. Однако в современной практике сооружения караски появились новые тенденции – известны случаи, когда подобные каменные колонны были сложены учащимися во время выпускного вечера «в честь выпуска» или в честь 70-летия Победы в Великой Отечественной войне, с принесением обета верности родной деревне и святому месту [21].

Отдельные объекты поклонения связаны с легендами о пророке Мухаммеде, Коране или о чудесных явлениях. Ф. Надыршина в 1982 г. записала от жителя д. Кадырша Зилаирского р-на Башкирии легенду о том, что пророк Мухаммед и его сын (!), прыгнув со

скалы, оставили на плоском камне у р. Бирмас следы своих ног [22, с. 49, 485]. Сегодня к камню под названием Пайгамбар-Таш можно проехать со стороны д. Акназарово Хайбулинского р-на и со стороны д. Кадырша Зилаирского р-на Башкирии, но жители обеих деревень неохотно указывают путь, говоря лишь, что надо идти вдоль р. Бирмас, которая очень сильно петляет. Краткое описание пути жителями д. Акназарово сводится к фразе «Семь раз переехать через реку». Беседы с «хранителем» камня – имамом мечети д. Кадырша Нуритдин-хазратом, посещения Пайгамбар-Таш во время пятничных служб и праздника Ураза-байрам, наличие «приношений» – монет и злаков, прикрытие «следа ноги» плоскими камнями, уклончивые ответы местных жителей, которые уверяют незнакомцев в том, что «дорога к камню очень плохая, никто не найдет», – все свидетельствует о том, что Пайгамбар-Таш является табуированным объектом поклонения мусульман близлежащих деревень. Известно также, что камень является объектом паломничества жителей южноуральских районов Башкирии, а также прилегающих районов Оренбуржья. В 2010 г. Пайгамбар-Таш и небольшой родник возле него были обнесены забором, здесь же устроены скамья и навес. В том же Зилаирском районе местные жители д. Кадырша обнаружили аят Корана, «проступивший» на каменном фундаменте хозяйственной постройки. Камень также стал объектом поклонения [23].



Пайгамбар-Таш. Зилаирский р-н РБ, 2009. Фото А.Б. Юнусовой

Жертвоприношения – один из главных элементов посещения святых мест. Название горы Курмантау в Гафурийском районе переводится как «жертвенная гора», на ее вершине расположены большие зольники, связанные с древним культом огня и жертвоприношениями. Такие же зольники – жертвенные места – есть в Бирском районе у д. Ново-Биктимирово и в других районах. В настоящее время известные жертвенные места наносятся нами на электронную карту [24, с. 242]. С древним культом огня связаны и другие объекты, почитаемые ныне как мусульманские, например, среди приношений к Пайгамбар-Таш можно было видеть обгоревшие спички, которые должны символизировать разведение огня.

Официальное мусульманское духовенство Башкирии в лице муфтия Нурмухамета Нигматуллина и членов ДУМ РБ осуждает практику посещения мусульманами могил и других святых мест. Верховный муфтий России Талгат Таджуддин, напротив, неоднократно указывал не только на возможность посещения мест захоронения святых, но и подчеркивал, что это сунна пророка Мухаммада, т.е. сам пророк посещал святые места. Известно, что в практику хаджа входит посещение гробниц, усыпальниц, могил, мавзолеев сподвижников пророка, султанов, шейхов, шахидов. Отправляющийся в хадж мусульманин стремится посетить как можно большее количество таких святых мест и помолиться на них. Так, описывая свое путешествие в Мекку в 1899–1900 гг., паломник из Симбирской губ. Фатхулла Альмушев передает свои восторженные чувства, которые испытал, посетив в один день в Дамаске более 15 святых мест, в т.ч. усыпальницу сподвижника и знаменосца пророка Мухаммеда, еще одного сподвижника пророка мекканца Талхи, место упокоения головы Хусейна, место погребения 200 асхабов (сахабов), гробницу персидского суфия Баязида Бистами и др. Вознося здесь молитвы, паломники верили, что они «будут обязательно услышаны Аллахом» [25, с. 28–32].

Подобная практика поклонения могилам и иным святым местам провоцирует всплески фундаментализма радикально настроенной части мусульманской молодежи. Напри-

мер, посещение Нарыс-Тау и других объектов поклонения толпами мусульман во время встреч с Шейхом Мехметом Адилем вызывает резкое неприятие со стороны членов группы «ШураРБ», которые считают это величайшим грехом, подчеркивают недопустимость идолопоклонничества в исламе [26]. В связи с активно проявляемой нетерпимостью в вопросе посещения святых мест и поклонения могилам члены этого сообщества причислены к последователям фундаменталистского течения в исламе – ваххабизма.

В культивировании архаичных традиций выявлены и другие негативные тенденции, в т.ч. связанные с нарушениями федерального законодательства в области охраны объектов историко-культурного наследия. Одна из них – **сакрализация археологических памятников**, которые также становятся объектами поклонения. Это погребально-культурные сооружения, курганы, а также и городища, остатки древних поселений, развалины. В 2010–2013 гг. в Башкирском Зауралье зафиксированы факты использования объектов археологического наследия в обрядовой практике башкирского населения [27, с. 99–102, 28, с. 240]. Примером может служить культ почитания воина-защитника у д. Москово Учалинского района Башкирии, сопровождающийся сакрализацией Кантубинских II курганов, которые в 1965 г. были исследованы археологами. По мнению местных жителей, археолог, раскопав курган, лишил их защиты и покровительства сверхъестественных сил. Схожая легенда о воинах-защитниках была зафиксирована в ходе обследования ранее неизвестного курганного некрополя Калуево-1 (д. Калуево, Учалинского района РБ). Посещение возвышенности, на которой находятся курганы, стало неотъемлемой частью большинства мусульманских праздников. Примером может послужить еще один каменный курган близ д. Сураманово Учалинского района РБ, предположительно относящийся к эпохам раннего железного века / средневековья. В XIX–XX вв. курган использовался местными жителями как место исцеления заболеваний мочеполовой системы домашних животных. Хозяева животных, в основном лошадей, водили их кругами вокруг насы-

пи, руководствуясь представлением о том, что благодаря духам происходил процесс выздоровления. С недавних пор население начало называть курган «аулия кабере», ассоциируя со святым человеком, якобы захороненным в древности на этом месте. Веря в сакральность захоронения, мусульмане идут к кургану и обращаются с мольбами к Аллаху, стоя спиной к Каабе. Сам курган представляется не только почитаемым местом, но и своеобразным местом почета, выбираемым в нарушение всех правил и норм законодательства для захоронения особо уважаемых личностей в настоящее время. Известен случай, когда глава одного из районов распорядился захоронить своего сына и установить надгробие на вершине кургана. Отдельные археологические объекты – средневековые мусульманские памятники, исследованные Г.Н. Гарустовичем [29, с. 39–45], такие как мавзолей Хусаин-бека в Чишминском районе Башкортостана, стали местом проведения ежегодных мусульманских «народных» съездов [30, с. 366].

Вторая тенденция – **включение объектов поклонения в туристические «паломнические» маршруты**, предлагаемые туристическими фирмами. Например, туристическая компания «Буранбай» на своем сайте сообщает о том, что «организует экскурсии к святым местам, располагающимся на территории Южного Урала. Сюда приезжают помолиться, попросить помощи и исцеления», подчеркивает, что целью паломнического тура является совершение религиозных обрядов и участие в них, «получение благодати, духовного и физического исцеления, совета; исполнение обета или наказания для искупления грехов», а объектом паломничества могут быть не только храмы, места захоронения и мощи святых, вершины гор, камни и скалы, озера, источники и деревья. В перечне святых мест, включенных в паломнические туры, есть могила старца Мужавира, мавзолей Хусейн-Бека, могила Риззэтдина Фахретдина, могила первого муфтия Мухамеджана Гусейнова, мощи Моисея Уфимского, место явления иконы Табынской Божьей Матери, источник старицы блаженной Варвары, Свято-Никольский храм, Кизильский женский монастырь, Аркаим [31].

Массовое посещение могил, расположенных в большинстве своем на территории деревенских кладбищ, вызывает возмущение сельчан, особенно родственников. «Поездки любого рода на могилы любых людей, в т.ч. знаменитых, надо прекратить, считает участник дискуссии в блоге. Это кощунство. Какой-то дикий обычай взяли ездить группами из мечетей. ... Толпами топчутся» [32].

Паломнический туризм и выстраивание маршрутов по «святым» местам, вовлечение культовых объектов в туристическую индустрию отражает общую тенденцию коммерциализации духовной сферы. Еще одним новшеством стала криминализация сферы культовой обрядности, связанной с традицией почитания ишанов, просветителей-целителей и других «святых». Распространены мошеннические действия отдельных лиц и псевдоисламских сект, действующих под предлогом целительства и посещения с этой целью «святых мест». В 2011 г. в Уфе появилась псевдорелигиозная секта «Орда», члены которой лечили людей кнутом и землей с могил, обещали исцеление от всех болезней и выманивали деньги у пациентов. Эта же секта, действовавшая под названием «Ата жолы» (Путь предков), уже была в судебном порядке запрещена в Казахстане [33, с. 55–60]. Не имея лицензии на медицинскую практику, руководитель секты ставил обращающимся лицам диагнозы хронических и неизлечимых заболеваний, а в «лечении» использовал религиозные обряды в форме «камчевания», нанося удары кожаной плеткой и окуривая больных, «вызывал» духов святых предков. Больным «для излечения» давался целебный порошок, представляющий собой смесь размолотого сахара и семян черной белены – ядовитого растения, обладающего галлюциногенными свойствами. Учитывая, что у местных мусульман сохранились традиции почитания духов предков и посещения святых мест, члены «Орды» предлагали мусульманам пройти курс лечения с выездом к святым местам для общения с духами предков, устраивали ночные обряды на кладбищах, внушали, что могут открыть у своих адептов дар ясновидения и сделать из них на-

стоящих святых (аулия). Сектанты занимались вымогательством, внушая, что путь к святости предполагает отказ от всех материальных благ, денег. Как рассказали свидетели, «лечение» заключалось в битье кнутом и принуждении пить воду с растворенной в ней землей с могил. Руководители секты использовали при вымогательстве денег за «лечение» психотехнологии с изменением сознания.



Камень со «священной надписью», д. Кадырша Зилаирского р-на РБ, 2010. Фото А.Б. Юнусовой

Против членов «Орды» было возбуждено уголовное дело по части 1 статьи 239 УК РФ (создание религиозного объединения, деятельность которого сопряжена с насилием над гражданами или иным причинением вреда их здоровью). Наказание по этой статье предусматривает лишение свободы сроком на три года. 15 июля 2011 г. Ленинский районный суд Уфы запретил деятельность секты [34]. Тем не менее в 2012–2013 гг. последователи секты «Орда» стали действовать в районах проживания башкирского населения Челябинской области (пос. Измайловский Кизильского р-на), в Уфе и в д. Баишево Баймакского р-на [35]. Известно, что и в 2015 г. деятельность членов «Орды» продолжается, что объясняется доверием к ним местного населения. Такое доверие – результат архаизации сознания верующих, общающихся с малообразованными имамами, которые зачастую практикуют обычное суеверие, преобладание на Южном Урале так называемого «стариковского» ислама, который ограничивается условным выполнением необходимых при рождении и похоронах ритуалов.

К криминальной сфере относятся также **мнимые захоронения**. Появились мошенники, которые под предлогом организации паломнического туризма собирали денежные средства, нанимали автобусы и возили людей по «святым местам», выдавая за них разные объекты, не имеющие ничего общего ни с религией, ни с захоронениями, ни с верой. Так, людей привозили к так называемой «могиле двух святых» – месту вдоль трассы Челябинск – Магнитогорск, где якобы недавно было открыто захоронение двух мусульманских служителей. Здесь был установлен «могильный» камень, а рядом – ящик для сбора денег. Как было установлено, сотрудникам управления охраны объектов недвижимого культурного наследия по Челябинской области ничего не известно об этом объекте, нет никаких разрешительных документов на установку «памятника», и на этой полянке вдоль дороги захоронений не было [36. ПМА, 2012].

Современные тенденции имеют под собой прочную традицию исторически сложившейся культовой практики, которая оказалась сегодня востребованной. Традиции башкирского ислама в виде сочетания канонического учения с элементами домусульманских верований – особенность, отличавшая «башкирский ислам» в XIX–XX вв. Обращение к архаичным пластам религиозной культуры в настоящее время отражает неустойчивость верующих, легко попадающих под влияние спекулирующих на религиозных чувствах различного рода миссионеров, подверженность духовной сферы криминализации, внутренние противоречия в среде современных мусульман. Отмеченные в статье проблемы и негативные тенденции, связанные с мобилизацией архаизма, подтверждают мысль А. Тойнби о том, что архаизм – это не просто академическое упражнение, но вполне определенный образ жизни, а проблема, вызывающая к жизни архаизм, – это проблема излечения душевной болезни, вызванной социальным распадом [37].

Статья подготовлена при поддержке РГНФ, проект № 15-01-12014.

Литература

1. Абсалямова Ю.А. Неошаманизм в новом обличье // Городские башкиры: проблемы этнокультурного и социально-демографического развития. Уфа: ИИЯЛ УНЦ РАН, 2014. С. 55–60.
2. Аминев З.Г. О поклонении башкирами-мусульманами могилам святых (ли) // Зайнулла Расулев – выдающийся башкирский мыслитель-философ, теолог и педагог-просветитель мусульманского мира: Мат-лы международной научно-практической конференции (5–7 июня 2008 г., г. Уфа). Уфа: РИЦ БГУ, 2008. С. 10–15.
3. Гусева Ю.Н. Ишанизм как суфийская традиция Средней Волги в XX веке: формы, смыслы, значение. М.: Медина, 2013.
4. Насыров И.Р. Основания исламского мистицизма (генезис и эволюция). М.: Языки славянских культур, 2009. 552 с.
5. Ямаева Л.А. Суфийские братства на территории исторического Башкортостана // Ватандаш. 2008. № 7. С. 162–181.
6. Юнусова А.Б. Ислам и мусульмане Южного Урала в правовом пространстве Российской империи: Документальная антология XVI–XIX вв. Уфа, 2011. С. 99–100.
7. Минибаева З.И. О посохе мусульманских святых у башкир // Материальная культура башкир и народов Урало-Поволжья: сб. материалов Межрегиональной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения М.Г. Муллагулова. Уфа: Гилем, 2008. С. 148–153.
8. Якшибаева Л. Сказание о целителе Мужавире. Баймак, 2011. С. 3–4.
9. Юнусова А.Б. 33 года служения Истине и Отечеству. Уфа, 2013. С. 93–95.
10. Башкирский краеведческий сборник / под ред. Ш.Х. Сюнчелей. Вып. 1. Уфа, 1926. С. 48.
11. Юнусова А.Б. Ислам в Башкортостане. Уфа: УПК, 1999. С. 32.
12. Юнусова А.Б. Ислам в Башкортостане. М.: Логос, 2007. С. 30.
13. Дмитрий Дмитриев. Гора Ауш и источник Аулия. URL: <http://www.cheltravel.ru/attractions/nature/aush-aulija/>.
14. Текущий архив ИЭИ УНЦ РАН. Отчет о командировке. 24 мая 2015 г.
15. http://proufu.ru/news/podrobno/persony/sheykh_mekhmet_adil_ta_zhizn_yavlyaetsya_ekzamenom_dlya_yudey/; Сохбеты (беседы) в Башкортостане / Шейх Мехмет Адиль ан-Накшбанди. Уфа: Башкортостан, 2013; <http://www.sufirb.ru/visit-in-2015>; <https://vk.com/public63506126>; <http://www.sufi.su/novosti?view=item&id=991>.
16. Юнусова А.Б. Распространение ислама в Башкортостане // Очерки истории мусульманской

цивилизации. Т. II. Эпоха Великих мусульманских империй / коллективная монография под общей редакцией Ю.М. Кобищанова. Ч. II. М.: РОСПЭН, 2009. С. 453–500.

17. Расулевские чтения: ислам в истории и современной жизни России // Мат-лы всероссийской научно-практической конференции (г. Троицк, 29 марта 2012 г.). Челябинск–Уфа, 2013.

18. Лепехин И.И. Дневные записки путешествия доктора Академии наук адъютанта Ивана Лепехина по разным провинциям Российского государства. Ч. 2 (Вторая часть Дневных записок путешествия академика и медицины доктора Ивана Лепехина). СПб.: Тип. Императорской Академии Наук, 1772. С. 31–32.

19. Аминев З.Г. Этногенетические проблемы и этническая история башкир. Уфа, 2006. С. 26–28.

20. Котов В.Г. Элементы почитания гор на Южном Урале // Вестник ВЭГУ. 2012. № 6(62). С. 95–100.

21. Юнусова А.Б. ПМА, Баймакский, Хайбуллинский, Зиянчуринский, Зилаирский р-ны РБ, 2009; ПМА, Зилаирский р-н РБ, 2010.

22. Башкирское народное творчество. Т. 2. Предания и легенды / сост., автор вступ. ст. и коммент. Ф.А. Надршина. Уфа, 1987. С. 49, 485.

23. Юнусова А.Б. ПМА, Хайбуллинский р-н РБ, 2009; ПМА, Зилаирский, Хайбуллинский р-ны РБ, 2010; ПМА, д. Кадырша Зилаирского р-на РБ, 2011; ПМА, Зилаирский р-н РБ, 2015.

24. Юнусова А.Б. Геоинформационная система «Религии и этноконфессиональные процессы на Южном Урале» // XI Конгресс антропологов и этнологов России: сб. материалов. Екатеринбург, 2–5 июля 2015 г. / Отв. ред.: В.А. Тишков, А.В. Головнев. М.; Екатеринбург: ИЭА РАН, ИИиА УрО РАН, 2015. С. 242.

25. Альмушев Х. Хадж-Наме. Книга о хадже. Путевые заметки. Н.-Новгород, 2006. С. 28–32.

26. Ширк — величайший грех! Гора Нарыстай. URL: <http://shurb.ru/media/videos/shirk-velichayshiy-grekh-gora-narystau-v/>.

27. Тузбеков А.И., Бахшиев И.И. Объекты археологического наследия Башкирского Зауралья в современной ритуальной практике юго-восточных башкир // Ислам и государство в России: сб. материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 225-летию Центрального духовного управления России – Оренбургского магометанского духовного собрания / под ред. А.Б. Юнусовой. Уфа, 2013. С. 99–102.

28. Тузбеков А.И. ГИС в изучении погребально-культурных сооружений мусульман на Южном Урале // XI Конгресс антропологов и этнологов России: сб. материалов. Екатеринбург, 2–5 июля 2015 г. / отв. ред.: В.А. Тишков, А.В. Головнев. М.; Екатеринбург: ИЭА РАН, ИИиА УрО РАН, 2015. С. 240.

29. Гарустович Г.Н. К вопросу об особом типе памятников археологии XVI в. на территории Башкортостана (кладбища с каменными надгробиями и исламскими эпитафиями) // Проблемы востоковедения. 2012. № 2(56). С. 39–45.

30. Юнусова А.Б., Азаматов Д.Д. 225 лет ЦДУМ / под общ. ред. А.Б. Юнусовой. Уфа, 2013. С. 366.

31. http://buranbai.ru/programmy_otdyha/palomnicheskij (дата обращения 06.01.2011).

32. <http://blog-rkhamitov.livejournal.com/19825.html?thread=9113969> (дата обращения 6.01.2011).

33. Абсалямова Ю.А. Неошаманизм в новом обличье // Городские башкиры: проблемы этнокультурного и социально-демографического развития. Уфа: ИИЯЛ УНЦ РАН, 2014. С. 55–60.

34. <http://www.aif.ru/health/news/90272> (дата обращения 26.07.2011).

35. Суд в Уфе оштрафовал организатора секты, где людей «лечили» вызовом духов предков. URL: <http://www.interfax-religion.ru/?act=news&div=53741> (дата обращения 10.12.2013).

36. Юнусова А.Б. ПМА, г. Троицк Челябинской обл., 2012.

37. Тойнби А. Постыжение истории. Ч. 3. М.: Айрис-Пресс, 2002. С. 330.

MOBILIZING THE PAST: RECENT TRENDS IN THE TRADITIONAL WORSHIP PRACTICE OF BASHKIR MUSLIMS

© A.B. Yunusova

Kuzeev Institute for Ethnological Studies, Ufa Scientific Centre, RAS,
6, ulitsa K. Marksa, 450077, Ufa, Russian Federation

On the basis of the author's field data and the research works of modern Bashkir ethnographers, this paper analyses recent trends in the practice of worshipping holy places still preserved among the Bashkir Muslims and gives a brief overview of the religious sites in Bashkortostan.

Key words: holy places, pilgrimage, pilgrimage tourism, healing, karamat, Ishan, quasi shrines, sacralization of archaeological sites.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В РОССИЙСКИХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© Г. Иом Дин

Приводится обзор практики применения метода анализа иерархий в российских и зарубежных исследованиях современных социально-экономических процессов. В обзор включены также работы ученых из Республики Башкортостан. Распределение работ по годам, областям науки позволяет выявить основные направления применения метода для решения задач управления и оценки социально-экономических проектов.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, многокритериальность, согласованность, управление, оценка проектов.

Метод анализа иерархий. Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный более 40 лет назад Т. Саати [1], успешно применяется в различных областях для принятия решения с учетом множества факторов, требующих многокритериального анализа. Название метода связано с оценкой важности и ранжированием критериев с помощью иерархической модели, описывающей несколько уровней целей и критериев сложной прикладной задачи. На верхнем уровне иерархии находится выбор наилучшего решения, например, наилучшего инвестиционного проекта, варианта землепользования, вида транспорта, структуры компании и т.д. На втором уровне могут находиться виды критериев для выбора этого наилучшего решения, например, для выбора наилучшего инвестиционного проекта это могут быть финансовые, социальные, экологические критерии и др. На следующем уровне каждый из видов критериев может быть представлен как набор показателей – критериев этого данного уровня. Например, вид критериев «финансовые» может быть представлен как совокупность показателей прибыли, срока окупаемости и т.д. Формирование такой структуры требует хорошего понимания технического, экономического, социального аспектов и взаимодействия факторов, влияющих на выбор лучших из допустимых решений. МАИ позволяет придавать раз-

ную степень важности критериям, выбранным для каждого уровня иерархии рассматриваемой задачи. Степени важности используются для усреднения этих критериев и составления из них единого «взвешенного» критерия для каждого уровня. Это, в свою очередь, позволяет ранжировать альтернативные решения в соответствии с целью поставленной задачи.

Широкое распространение МАИ объясняется прежде всего простотой опроса экспертов, которым предлагаются возможные парные сравнения между выбранными критериями. Например, сравнивая критерии А и Б, эксперт может выбрать между ответами «А намного менее важен, чем Б», «менее важен», «одинаково важен», «более важен» или «намного более важен». Каждому варианту ответа присваивается его численное значение по одной из принятых в МАИ шкал. Например, ответу «намного менее важен» может соответствовать значение 1, ответу «менее важен» – значение 3, ..., ответу «намного более важен» – значение 9. Обозначая степень важности критерия i по отношению к критерию j как a_{ij} , и полагая, что для каждого критерия i его сравнение с самим собой выражается как $a_{ii} = 1$, а сравнение критерия j с критерием i выражается как $a_{ji} = 1/a_{ij}$, ответы каждого эксперта на некотором уровне, который описывается, например, тремя критериями, запи-

сываются в виде положительной обратносимметричной матрицы Saaty [2] (рис. 1).

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Пример матрицы парных сравнений для случая трех сравниваемых критериев

Метод может быть применен к количественным критериям («стоимость проекта», «снижение объема импорта того или иного продукта»), качественным («передача ноу-хау в рамках сравниваемых проектов», «репутация поставщика») и их сочетанию Wedley [3].

Другой причиной популярности МАИ является его проверенная результативность в поддержке выбора решений в прикладных задачах. Применение методов экспериментальной экономики и повторные опросы группы респондентов показали, что ознакомление с результатами МАИ позволяет экспертам улучшать свои решения, пересмотрев ранжирование критериев и не отвергая полностью первоначальные «интуитивные» решения. В частности, высока надежность МАИ в выборе наилучшего и наихудшего решений Ishizaka and Labib [4]. Проверка МАИ на разнообразных прикладных задачах также подтверждает его практическую ценность и возможность сочетания с другими подходами к решению многокритериальных задач. Например, оценка поставщиков для крупных фирм Bruno et al. [5], оптимальный состав культур при оценке эффективности поддержки сельского хозяйства региона Yom Din [6]. Во многих публикациях показана теоретическая корректность МАИ Harker and Vargas [7].

Важным достоинством МАИ является возможность проверки ответов каждого из экспертов на согласованность. Например, если эксперт при рассмотрении критериев А, Б, В отвечает, что критерий А важнее, чем Б, Б важнее, чем В, а В важнее, чем А, т.е. ответы считаются несогласованными. Эксперты, дающие несогласованные ответы, могут быть удалены из рассмотрения. Проверка на согла-

сованность является необходимой частью алгоритмов и компьютерных программ, используемых для применения МАИ.

Простота, универсальность (по отношению к критериям оценки решений) и результативность МАИ определяют широкий круг областей его применения. Важным преимуществом МАИ в приложениях является возможность совместного использования количественных и качественных критериев в иерархической модели.

Применение МАИ в зарубежных исследованиях. Один из первых обзоров практики применения МАИ был опубликован в 1986 г. исследователем из США Zahedy [8]. Автор привел перечень 26 областей применения МАИ, важнейшими из которых, по числу проанализированных статей, являются (реальная) экономика и планирование, затем энергия с точки зрения стратегии развития и распределение ресурсов, далее разрешение конфликтов, здравоохранение, производственные ресурсы. Автор отметил те черты, которые объединяют применения МАИ в разных областях: а) принадлежность подхода к области принятия решений; б) почти все альтернативы решений относятся к оценке инвестиционных проектов, новых технологий и производств; к отбору наилучшей из рассматриваемых альтернатив; к прогнозу относительно рассматриваемых альтернатив решений. Рассмотренные им примеры включали как количественные, так и качественные критерии решений.

В работе Sipahi and Timor [9] рассматриваются 232 статьи авторов из 41 страны о применении МАИ, опубликованные в зарубежной научной литературе в 2005–2009 гг. В 61% этих статей применение МАИ рассматривается в сочетании с альтернативными методами оценки и выбора, такими как метод статистической симуляции, целевого программирования, метод Делфи (обработки экспертных оценок), использования нечетких оценок и другие. Применение МАИ в области промышленности составило 33%, окружающей среды и сельского хозяйства – 11%, общих проблем принятия решений – 8%, затем идут

области энергии и транспорта (каждая по 6%), строительства – 5%, здравоохранения – 4%, и другие – 27%. Авторы отмечают интенсивный рост исследований с применением МАИ в исследуемый период и объясняют это убедительностью преимуществ метода для решения прикладных задач.

В обзоре Vaidya and Kumar [10] рассматриваются 150 примеров применения МАИ, из которых 27 проанализированы подробно. Авторы рассматривают 3 группы применений МАИ: посвященные общим научным проблемам; исследующие конкретные прикладные задачи; использующие МАИ совместно с другими методами обработки данных и принятия решений. Среди общих научных проблем авторы выделяют следующие: выбор наилучших решений, оценка (проектов, технологий), анализ затрат и эффективности (cost-benefit analysis), оптимальное размещение ресурсов, планирование развития производства и регионов, ранжирование (критериев, показателей), и общие проблемы принятия решений. В качестве примера приводим перечень семи прикладных областей, в которых ищутся наилучшие решения в рассмотренных авторами исследованиях. Это выбор в социальной сфере и в области образования, выбор людей (руководителей), области производства, политики, конструирования, промышленности. Авторы отмечают, что большинство рассмотренных ими применений МАИ относятся одновременно к двум областям – например, к конструированию и выбору в области производства или выбору людей и выбору в социальной сфере и т.д. Особенно полезным оказалось применение МАИ в области конструирования и выбора в социальной сфере. Так же, как и авторы в [9], авторы данного обзора приходят к выводу, что МАИ часто используется в сочетании с другими методами – нечеткие (fuzzy) множества и оценки, линейное программирование, искусственные нейронные сети и др. Вместе с тем продолжается широкое применение МАИ как отдельно стоящего метода. Все это, заключают авторы, свидетельствует о гибкости методологии, заложенной в МАИ.

В одном из последних обзоров Velasquez and Hester [11] МАИ сравнивается с 10 другими методами многокритериального принятия решений. Авторы отмечают многочисленность применения МАИ в таких областях, как эффективность производства в компаниях, управление ресурсами, корпоративная политика и стратегия, государственное управление, политическая стратегия, планирование. Основными преимуществами МАИ авторы считают простоту использования благодаря попарным сравнениям критериев с последующим их ранжированием и, если надо, взвешиванием; возможность моделирования сложных проблем благодаря многоуровневой иерархической структуре метода; возможность работы с относительно небольшими массивами данных по сравнению с другими методами многокритериального принятия решений. Среди недостатков МАИ авторы отмечают возможную несогласованность ответов некоторых из экспертов, возникающую из природы парных сравнений. По этой же причине невозможно определить преимущества и недостатки отдельных критериев, поскольку мы обладаем информацией только по их попарному сравнению; невозможно добавлять критерии в ходе обработки данных, уже полученных от экспертов. Среди разнообразных успешных применений МАИ, проанализированных авторами, отметим следующие: 1) взвешивание критериев устойчивого развития морских акваферм (Гавайи) и на этой основе ранжирование ферм, приведшее к результатам, аналогичным полученным ранее без применения МАИ; 2) анализ деятельности телекоммуникационной компании (Бразилия) на основе индикаторов, ранжированных с помощью МАИ; 3) анализ городского водоснабжения (Нигерия); 4) оценка немонетарных критериев риска на железнодорожной сети в Польше и странах Балтии.

Мы также проанализировали последние зарубежные применения МАИ в 2011–2015 гг. в актуальной для России области инвестиционных сельскохозяйственных проектов. Отметим наблюдающиеся в этой области принципиальные различия в экономических и соци-

альных критериях у заинтересованных лиц – инвесторов, кредитных банков, руководителей регионов, и их различные оценки рисков проектов Yom Din [12]. Это создает объективные предпосылки и объясняет популярность применения методов многокритериального принятия решений, и в частности МАИ, для оценки и выбора наилучших проектов.

В статье van der Merwe et al. [13] из Южно-Африканской Республики сравниваются 12 сельскохозяйственных отраслей. Авторы провели 21 зональный семинар для фермеров и аграрных специалистов, на которых участники с помощью отраслевых бизнес-планов определяли сравнительную важность тринадцати выбранных критериев. Наиболее важными оказались критерии создания рабочих мест; создания дохода; экономической, социальной, экологической устойчивости; способности адаптации к изменяющимся экономическим условиям; использования местных ресурсов. После многокритериальной оценки бизнес-планов по нескольким сценариям, отличающимся способами сравнения критериев, авторы выявили наиболее предпочтительные для исследованной провинции страны отрасли – мясное скотоводство, овощи, производство козьего мяса.

Проекты «энергия из отходов» сельскохозяйственного производства в последнее время привлекают все больше внимания по двум причинам: а) с распространением интегрированных агро-промышленных комплексов полная переработка отходов производства (навоз, подстилка, отходы убойного цеха) стала обязательным условием при оценке проектов; б) во многих странах получение энергии из отходов субсидируется – например, эффективность «зеленого» повышенного тарифа на электроэнергию, производимую из отходов, проанализирована в статье Yom Din and Cohen [14]. Успешность многокритериального принятия решений по этим проектам обусловлена сочетанием финансовых и экологических факторов, а также политическими интересами – поддержкой фермеров через субсидирование дорогих пока технологий получения «зеленой» энергии. В статье

Brudermann et al. [15] анализируются перспективы заводов по производству энергии из биогаза, получаемого при переработке сельскохозяйственных отходов, в Австрии. Авторы сочетают МАИ и метод SWOT (*Strength/* сильные стороны – *Weaknesses/* слабые стороны – *Opportunities/* возможности – *Threats/* угрозы). Для каждой из категорий SWOT были выделены по 4 главных фактора, ранжированных с помощью МАИ. Для категории *Strength* наиболее важным оказался фактор «дополнительный источник дохода», для *Weaknesses* – «слабые финансовые показатели», для *Opportunities* – «использование биогаза для различных целей», для *Threats* – «зависимость субсидий от политических обстоятельств». В статье показано, что в Австрии финансовые факторы намного важнее, чем технологические, при оценке перспектив этих заводов.

Проблема оценки земельных участков исследуется в статье Lepikhina and Sannikova [16] на примере свободного участка в центре г. Янаула (Башкирия). На верхнем уровне иерархической модели авторы рассматривают критерии «преимущество расположения» (история использования участка и его доступность), «потенциал» (площадь, форма участка), «рыночный спрос» (развитость рынка, развитие инфраструктуры), и «технологическая пригодность» (ограничения по строительству). На нижнем уровне модели оцениваются различные индикаторы, описывающие эти факторы. Авторы предложили 6 альтернатив по использованию участка. Применение МАИ позволило оценить важность критериев и ранжировать в качестве наиболее предпочтительных альтернатив «жилое строительство» и «спортивный, развлекательный или фитнес-центр».

Практически важен опыт применения МАИ для ранжирования рисков в сельском хозяйстве, что непосредственно связано с принятием решений по сельскохозяйственным проектам и по развитию сельских регионов. В статье Toledo et al. [17] исследуются данные, собранные среди чилийских фермеров, для идентификации наиболее существен-

ных критериев риска. Таковыми оказались, по порядку ранжирования с помощью МАИ: изменчивость цен и затрат, человеческий фактор (квалификация фермеров и их работников, а также доступность последних на рынке труда), коммерциализация (ее авторы описывали через факторы количества покупателей на рынке и кооперации между фермерами) и климат. Полученные результаты авторы дифференцировали по регионам и сельскохозяйственным отраслям. Наименее рискованными отраслями оказались крупный рогатый скот и производство зерна, а наиболее рискованными – ягоды и овощи.

Исследование из Китая Luo and Hu [18] посвящено рискам инновационных проектов в сельскохозяйственных кооперативах. На основе обследования 106 фермерских кооперативов, использующих научно-технические новшества, авторы предлагают следующую иерархическую модель. На верхнем уровне находятся три группы факторов риска: внутренние, технологические и внешние. Каждая из групп включает в себя несколько видов риска второго уровня: а) внутренние факторы включают риск стоимости капложений более высокой для кооперативов, чем для других фирм; производственные риски (качество продукции, своевременность поставок); риск управления, в особенности на ранних стадиях проектов; риск дефицита специалистов; б) технологические факторы включают риск недостаточно апробированных технологий; риск неправильного выбора технологии из-за неполной информации; риск старения инноваций из-за того, что сельское хозяйство является «медленной отраслью», требующей сравнительно много времени на проведение прикладных исследований, внедрение и начальные производственные циклы; риск неудачной коммерциализации при передаче ноу-хау; в) внешние факторы включают рыночный и политический риски. Авторы иллюстрируют методы оценки рисков по их модели на примере 8 соревнующихся инновационных проектов.

Неопределенность при планировании сельского хозяйства, обусловленная изменчи-

востью погодных условий и цен на продукцию, изучается в статье Yom Din [19]. В ней рассматриваются критерии прибыли фермеров в различные годы – обычный, засушливый и год повышенных цен на продукцию сельского хозяйства. Важность критериев оценивается на основе анкетирования 32 экспертов на северо-востоке Израиля, производителей и научных работников. В целом для всех опрошенных экспертов наиболее важным оказался критерий «прибыль в обычный год» (доля в средневзвешенном критерии 49%), следующий по важности – «прибыль в засушливый год» (29%), и на последнем месте – «прибыль в год повышенных цен на продукцию» (22%). Различие в оценке критерия «прибыль в обычный год» – 58% для производителей и 41% для научных работников – оказалось статистически значимым.

Применение МАИ в российских исследованиях. Начало широкому знакомству российских исследователей с МАИ положила публикация в 1993 г. на русском языке монографии Саати [20], в переводе Вачнадзе. Поиск в Google Scholar по ключевым словам «метод анализа иерархий» до 2014 г. включительно дает около 2590 публикаций на русском языке. При этом до выхода в свет данной монографии опубликовано лишь 5 статей (0.2%). Для сравнения: аналогичный поиск по научным публикациям на английском языке дает 17900 публикаций, из них до 1993 г. включительно – 545 публикаций (3%). Работы, посвященные применению МАИ в российских исследованиях, можно разделить по тематике на две группы: а) описание МАИ и методические предложения по моделям иерархии и способам проведения расчетов, б) конкретные приложения и описание результатов из различных областей.

В статье А.Н. Тихомирова и Е.В. Сидоренко [21] предлагается модификация МАИ для экспертизы группой экспертов инновационных проектов в инвестиционных компаниях. Авторы рассматривают процесс формирования критериев в компаниях с разным финансовым положением и приоритетами, а затем – задачу по определению важности и

значимости критериев, решаемую с помощью МАИ. В предлагаемую модификацию метода входит упрощение шкалы сравнения критериев по важности – от 1 до 5 вместо традиционной в МАИ шкалы от 1 до 9. Таким образом, считают авторы, можно уменьшить неопределенность метода и компенсировать, в определенной степени, повышенную неопределенность инновационных проектов.

Во многих статьях на основе разработанных для поставленных прикладных задач моделей иерархии обосновываются выводы об эффективности МАИ для обоснования следующих многокритериальных решений:

1) Управленческие решения на уровне предприятий (критерии – ассортимент, качество, стоимость, сервис, надежность), Илларионов [22];

2) отбор и оценка управленческого персонала (профессиональные, деловые, морально-психологические критерии), Ломазов и Прокушев [23];

3) оценка состояния социальной ответственности предприятия (критерии роста заработной платы, повышение квалификации персонала, пенсионное обеспечение и др.), Клепиков и Пасечникова [24].

В статье Побегайлов и Погорелов [25] приводится иерархическая модель выбора наиболее эффективного варианта землепользования. Авторы рассматривают группы критериев: экономические, экологические, административные, социальные. Наибольший вес, соответственно приведенному порядку групп, получили критерии «эффективность использования земельного участка», «поддержание качества природной среды», «градостроительные нормы», «социальное благополучие района».

Как и в зарубежных исследованиях, МАИ широко используется при оценке инвестиционных проектов. В статье Бахтиярова [26] автор рассматривает четыре группы критериев качества таких проектов: «затраты проекта» (оценена как наиболее важная группа), «эффективность» (2-я по важности группа), «риски» (3-я по важности группа) и «общественная значимость» (наименее важная группа).

В статье Баев и Литке [27] представлена иерархическая модель многокритериальных решений в малом инновационном бизнесе. Авторы признают известную неопределенность понятия «инновация» и предлагают применять МАИ для управления этим бизнесом на региональном уровне. По их мнению, ранг инновационного проекта определяется двумя группами критериев – «потенциал инновации» и «потенциал проекта». Эти группы разделяются на критерии следующего уровня: «потенциал инновации» – на «степень новизны идеи» и «степень диффузии результатов идеи», а «потенциал проекта» – на «технологический потенциал», «социальный потенциал» и «экономический потенциал». В свою очередь эти критерии разделяются каждый на 4–7 критериев нижнего уровня. Например, «социальный потенциал» – на критерии «новые рабочие места», «налоговые отчисления в бюджет», «среднемесячная зарплата», «экологическая безопасность».

Применение МАИ в исследованиях ученых из Башкирии. Исследования с использованием МАИ проводятся в республике как в области социальной сферы, так и в области управления промышленностью. В одной из первых таких работ Бухарбаева [28] предлагаются критерии экономической, медицинской и социальной эффективности системы здравоохранения республики Башкортостан. Эти критерии разнородны по составляющим их величинам. Экономическая эффективность в статье определяется как отношение прибыли от платных медицинских услуг к их себестоимости. Медицинская эффективность – как сумма показателей, отражающих результативность (доля пациентов с положительной динамикой здоровья в общем числе пациентов) и объем диагностической и лечебно-оздоровительной деятельности, скорректированная на количество дефектов медицинских вмешательств. Социальная эффективность – как сумма показателей доступности лечения и поставки рабочих мест в системе здравоохранения, влияющих на качество жизни экономически активного населения. В качестве экспертов привлекались глав-

ные специалисты и врачи республиканских Министерства здравоохранения и клиник. Применение МАИ позволило присвоить веса критериям: экономическая эффективность – 41%, медицинская – 31 и социальная – 28%.

В работе Хайруллин и Терехов [29] исследуется проблема оценки строительных предприятий с помощью показателей эффективной деятельности. Авторы применяют МАИ для оценки среднеотраслевых показателей на основе случайной выборки 20 строительных предприятий Башкирии и других регионов. Для сравнения эффективности предприятий используются критерии: а) возможность отразить действительные намерения инвестора; б) качество и обширность данных; в) возможность учета рыночных условий; г) местонахождение, масштаб деятельности, доходность, юридическая форма предприятия. Применение МАИ для расчета показателей по отрасли строительства позволяет точнее оценивать стоимость ценных бумаг при формировании инвестиционного портфеля и анализировать качество управления строительным предприятием с целью увеличения его стоимости.

В работе Болдырев [30] анализируется эффективность деятельности вертикально-интегрированных нефтяных компаний. Одним из способов повышения эффективности этих компаний является оптимизация структуры составляющих их бизнес-единиц. Автор предлагает иерархическую модель, на вершине которой находится: глобальная цель компании, а на следующих этапах – оценки эталонного вклада бизнес-единиц в эту цель, их фактического вклада и степени использова-

ния их потенциала. Последний этап позволяет сделать выводы о возможном улучшении структуры компании. Применение модели к одной из российских нефтегазовых компаний позволило ранжировать ее бизнес-единицы по важности для достижения глобальной цели: а) разведки и добычи – 35%; б) корпоративного управления – 33%; в) нефтепереработки и нефтехимии – 19%; г) коммерции – 13%.

Обсуждение и заключение. До 1993 г. публикаций в русскоязычной научной прессе о применении МАИ почти не было. В период 1994–2014 гг. количество научных публикаций с использованием МАИ в российских изданиях (2585) составило около 15% от публикаций на английском языке (17355), а их рост был чрезвычайно быстрый, экспоненциальный (рис. 2).

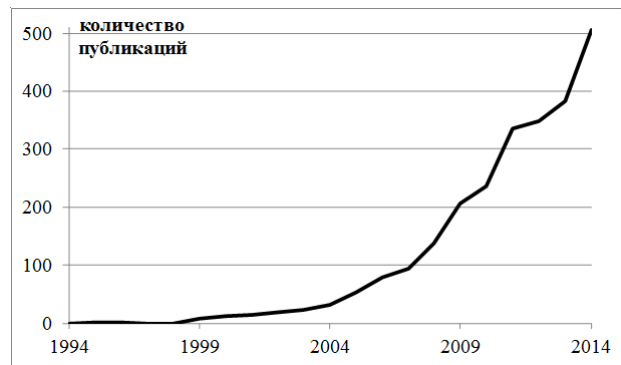


Рис. 2. Количество публикаций в российских исследованиях по теме МАИ (по данным Google Scholar)

Поиск на сайте КиберЛенинка по ключевым словам «метод анализа иерархий» среди всех статей, включенных в этот ресурс,

Т а б л и ц а

Статьи с применением МАИ в период 2006–2015 гг. (по данным КиберЛенинка)

Область применения	Число статей	Примечание, включая также
Методология	23	
Управление	20	уровни от предприятий до регионов
Финансы	19	торговлю
Промышленность, транспорт, АПК	37	охрану окруж. среды, оценку участков земли
Социальная сфера	30	здравоохранение, образование
IT	27	базы данных, мобильные приложения
Прочие	18	науку, туризм, безопасность
Всего	174	

и последующий анализ статей по областям применения дал следующие результаты. На 1-м месте по количеству опубликованных применений находится область «промышленность, транспорт, агропромышленный комплекс», куда входят и проекты по охране окружающей среды. На 2-м месте – «Социальная сфера», включая здравоохранение. Информационные технологии (технические разработки и программное обеспечение, готовые информационные продукты) – на 3-м месте (табл., рис. 3).

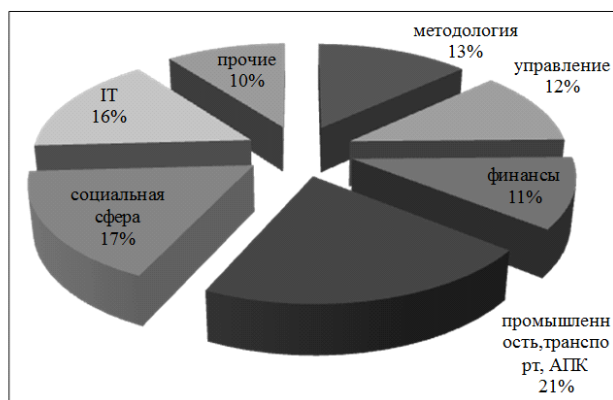


Рис. 3. Распределение статей по областям применения МАИ

Количество применений МАИ в последние 20 лет продолжает расти очень быстро за рубежом и в России, в частности, в исследованиях ученых из Республики Башкортостан. Области применения разнообразны и охватывают задачи управления и оценку проектов в реальной экономике, социальной сфере, ИТ, финансах, управлении, охране окружающей среды. Перспективой дальнейшего развития МАИ является его применение в сочетании с альтернативными методами многокритериального выбора для решения комплексных проблем: социально-экономических, регионально-отраслевых, сравнения различных видов риска.

Статья подготовлена при поддержке РГНФ, проект № 15-02-00044 «Этноконфессиональные и социально-экономические аспекты инвестиционной стратегии региона: разработка и апробация многокритериального метода оценки аг-

ропромышленных проектов на Южном Урале».

Литература

1. Saaty T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures // J. Math Psychol. 1977. № 15. P. 234–281.
2. Saaty T.L. How to make a decision: the analytic hierarchy process // European journal of operational research. 1990. № 48(1). P. 9–26.
3. Wedley W.C. Combining qualitative and quantitative factors – an analytic hierarchy approach // Socio-Economic Planning Sciences. 1990. № 24(1). P. 57–64.
4. Ishizaka A., Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process // Expert systems with applications. 2011. № 38(11). P. 14336–14345.
5. Bruno G., Esposito E., Genovese A., Passaro R. AHP-based approaches for supplier evaluation: Problems and perspectives // J. of Purchasing and Supply Management. 2012. № 18(3). P. 159–172.
6. Yom Din G. Industry and Academic Experts: Do They Differ in Their Weighting of Criteria for Agricultural Planning? 2015. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2633076>
7. Harker P. T., Vargas L. G. The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process // Management science. 1987. № 33(11). P. 1383–1403.
8. Zahedi F. The analytic hierarchy process—a survey of the method and its applications // Interfaces. 1986. № 16(4). P. 96–108.
9. Sipahi S., Timor M. The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications // Management Decision. 2010. № 48(5). P. 775–808.
10. Vaidya O. S., Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications // European J. of operational research. 2006. № 169(1). P. 1–29.
11. Velasquez M., Hester P. T. An analysis of multicriteria decision making methods // International J. of Operations Research. 2013. № 10(2). P. 56–66.
12. Yom Din G. Performance and profit sensitivity to risk: a practical evaluation of the agro-industrial projects developed by Israeli companies for the CIS and Eastern European countries // Agricultural and Food Economics. 2013. № 1(1). P. 1–23.
13. van der Merwe J.D., Cloete P.C., van Schalkwyk H.D. Choosing between agricultural development projects in the North West Province of South Africa: A multiple criteria analysis // African J. of Agricultural Research. 2012. № 7(27). P. 3906–3917.
14. Yom Din G., Cohen E. Agricultural Waste Management: Case Study of a Waste Treatment Plant for Animal Manure // Eva Maleviti (ed.), Recent Developments in Energy and Environmental Research. 2011. P. 159–170.

15. Bruderhann T., Mitterhuber C., Posch A. Agricultural biogas plants—A systematic analysis of strengths, weaknesses, opportunities and threats // *Energy Policy*. 2015. № 76. P. 107–111.
16. Lepikhina O.J. & Sannikova A.P. Expert assessment of the most effective use of the land plot // *Life Science J*. 2014. № 11(5). P. 542–546.
17. Toledo R., Engler A., Ahumada V. Evaluation of risk factors in agriculture: an application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) methodology // *Chilean J. of agricultural research*. 2011. № 71(1). P. 114–121.
18. Luo J. L. & Hu Z. H. Risk paradigm and risk evaluation of farmers cooperatives' technology innovation // *Economic Modelling*. 2015. № 44. P. 80–85.
19. Yom Din G. Industry and Academic Experts: Do They Differ in Their Weighting of Criteria for Agricultural Planning? 2015. Available at SSRN: doi.org/10.2139/ssrn.2633076
20. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
21. Тихомирова А.Н., Сидоренко Е.В. Модификация метода анализа иерархий Т. Саати для расчета весов критериев при оценке инновационных проектов // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 2. URL: <http://www.science-education.ru/102-6009> (дата обращения: 24.02.2015).
22. Илларионов М.Г. Применение метода анализа иерархий в принятии управленческих решений // *Актуальные проблемы экономики и права*. 2009. № 1. С. 37–42.
23. Ломазов В.А., Прокушев Я.Е. Решение задачи экономичного многокритериального выбора на основе метода анализа иерархий // *Научные ведомости Белгородского государственного университета*. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2010. Т. 7(14-1). С. 2–10.
24. Клепиков Д.М., Пасечникова Л.В. Методика интегральной оценки состояния социальной ответственности предприятия // *Проблемы современной экономики*. 2012. № 1(41). С. 435–437.
25. Побегайлов О.А., Погорелов В.А., Оценка наиболее эффективного варианта землепользования // *Инженерный вестник Дона*. 2013 №2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1686> (доступ свободный).
26. Бахтияров Р.С. Оценка качества инвестиционных проектов в республике Татарстан // *Актуальные проблемы экономики и права*. 2011. № 3 (19). С. 56–61.
27. Баев Л.А., Литке М.Г. Иерархическая модель принятия многокритериальных решений регионального управления малым инновационным бизнесом // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Экономика и менеджмент. 2011. Вып. 18, № 21(238). С. 93–97.
28. Бухарбаева Л.Я. Комплексная оценка эффективности функционирования системы здравоохранения Республики Башкортостан // *Известия СПбГЭТУ*. 2004. № 2. С. 16–24.
29. Хайруллин В.А., Терехов И.Г., Шакирова Э.В. Использование мультипликаторов в оценке эффективности финансово-хозяйственной деятельности предприятий строительства // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2013. № 5(18).
30. Болдырев Е.С. Анализ и повышение эффективности вертикально интегрированных нефтяных компаний на основе механизма построения структур бизнес-единиц // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2014. № 2(21).



A SURVEY OF THE APPLICATION OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS IN RUSSIAN AND FOREIGN STUDIES

© G. Yom Din

The Open University of Israel,
108, Ravutzky St., POB808, Raanana 43107, Israel

The article gives general characteristics of the analytic hierarchy process and presents a survey of its application in Russian and foreign studies. In particular, the article includes research performed by the scientists of Bashkortostan. The classification of the research works by years and by different fields of science makes it possible to reveal major applications of this method for solving problems in management and assessment of socio-economic projects.

Key words: analytic hierarchy process, multicriterial, consistency, management, project evaluation.