

Научный журнал

Основан в 2010 г.
Выходит 4 раза в год

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Коми научный центр УрО РАН»

ИЗВЕСТИЯ

КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№3(35)

2018

Главный редактор:

академик *А.М. Асхабов*

Редакционная коллегия:

д.г.-м.н. *А.И. Антошкина*, д.м.н. *Е.Р. Бойко*, д.э.н. *Н.М. Большаков*,
д.б.н. *В.В. Володин*, д.б.н. *М.В. Гецен* (зам. главного редактора), д.ф.-м.н. *Н.А. Громов*,
д.б.н. *С.В. Дёгтева*, к.геогр.н. *Т.Е. Дмитриева*, д.и.н. *И.Л. Жеребцов*,
д.и.н. *А.Е. Загребин*, д.и.н. *Е.Ф. Кринко*, чл.-корр. РАН *А.В. Кучин*,
д.г.-м.н. *О.Б. Котова*, чл.-корр. РАН *В.Н. Лаженцев* (зам. главного редактора),
д.г.-м.н. *Н.А. Малышев*, д.и.н. *В.И. Меньковский*, чл.-корр. РАН *А.А. Москалев*,
д.и.н. *П.Ю. Павлов*, к.г.-м.н. *А.М. Плякин*, к.х.н. *А.Я. Полле* (отв. секретарь),
чл.-корр. РАН *И.М. Рощевская*, д.х.н. *С.А. Рубцова*,
к.и.н. *А.В. Самарин* (помощник главного редактора), д.филол.н. *Г.В. Федюнева*,
д.т.н. *Ю.Я. Чукуреев*, д.б.н. *Е.В. Шамрикова*,
д.г.-м.н. *В.С. Шатский*, д.б.н. *Д.Н. Шамаков*

Редакционный совет:

акад. *В.В. Алексеев*, чл.-корр. РАН *В.Н. Анфилов*, д.и.н. *Е.Т. Артемов*,
чл.-корр. РАН *А.А. Барях*, акад. *В.И. Бердышев*, акад. *В.Н. Большаков*,
проф. *Т.М. Бречко*, акад. *Л.А. Вайсберг*, акад. *А.Д. Гвишиани*,
д.э.н. *В.А. Ильин*, акад. *В.А. Коротеев*, чл.-корр. РАН *С.В. Кривовичев*,
к.т.н. *Н.А. Манов*, чл.-корр. РАН *Ю.Б. Марин*, акад. *В.П. Матвеев*,
акад. *Г.А. Месяц*, чл.-корр. РАН *Е.В. Пименов*, чл.-корр. РАН *В.Н. Пучков*,
проф. *Д. Росина*, акад. *М.П. Рощевский*, д.и.н. *Э.А. Савельева*,
чл.-корр. РАН *А.Ф. Титов*, д.и.н. *И. Фодор*, акад. *В.Н. Чарушин*,
д.т.н. *Н.Д. Цхада*

Адрес редакции:

167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 24
Коми научный центр УрО РАН, каб. 317.
Тел. (8212) 24-47-79, факс (8212) 24-22-64
E-mail: journal@frc.komisc.ru
www.izvestia.komisc.ru

Подписной индекс в каталоге «Почта России» 52047

ISSN1994-5655

Журнал включен в перечень рецензируемых
научных изданий ВАК

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору за
соблюдением законодательства в сфере массовых ком-
муникаций и охране культурного наследия. Свид. о ре-
гистрации средств массовой информации ПИ № ФС 77-
26969 от 11 января 2007 г.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр УрО РАН», 2018

Editor-in-chief:

academician *A.M.Askhabov*

Editorial Board:

Dr. Sci. (Geol.&Mineral.) *A.I.Antoshkina*, Dr. Sci. (Med.) *E.R.Boyko*,
Dr. Sci. (Econ.) *N.M.Bolshakov*, Dr. Sci. (Biol.) *V.V.Volodin*,
Dr. Sci. (Biol.) *M.V.Getsen* (Deputy Chief Editor), Dr. Sci. (Phys.&Math.) *N.A.Gromov*,
Dr. Sci. (Biol.) *S.V.Degteva*, Cand. Sci. (Geogr.) *T.E.Dmitrieva*,
Dr. Sci. (Hist.) *I.L.Zherebtsov*, Dr. Sci. (Hist.) *A.E.Zagrebin*, Dr. Sci. (Hist.) *E.F.Krinko*,
RAS corresp. member *A.V.Kuchin*, Dr. Sci. (Geol.&Mineral.) *O.B.Kotova*,
RAS corresp. member *V.N.Lazhentsev* (Deputy Chief Editor),
Dr. Sci. (Geol.&Mineral.) *N.A.Malyshev*, Dr. Sci. (Hist.) *V.I.Men'kovsky*,
RAS corresp. member *A.A.Moskalev*, Dr. Sci. (Hist.) *P.Yu.Pavlov*,
Cand. Sci. (Geol.&Mineral.) *A.M.Plyakin*,
Cand. Sci. (Chem.) *A.Ya.Polle* (Executive Secretary),
RAS corresp. member *I.M.Roshchevskaya*, Dr. Sci. (Chem.) *S.A.Rubtsova*,
Cand. Sci. (Hist.) *A.V.Samarin* (Assistant Editor-in-Chief), Dr. Sci. (Philol.) *G.V.Fedyuneva*,
Dr. Sci. (Tech.) *Yu.Ya.Chukreev*, Dr. Sci. (Biol.) *E.V.Shamrikova*,
Dr. Sci. (Geol.&Mineral.) *V.S.Shatsky*, Dr. Sci. (Biol.) *D.N.Shmakov*

Editorial Council:

acad. *V.V.Alekseev*, RAS corresp. member *V.N.Anfilogov*, Dr. Sci. (Hist.) *E.T.Artemov*,
RAS corresp. member *A.A.Baryakh*, acad. *V.I.Berdyshev*, acad. *V.N.Bolshakov*,
Prof. *T.M.Brechko*, acad. *L.A.Vaisberg*, acad. *A.D.Gvishiani*, Dr. Sci. (Econ.) *V.A.Ilyin*,
acad. *V.A.Koroteev*, RAS corresp. member *S.V.Krivovichev*, Cand. Sci. (Tech.) *N.A.Manov*,
RAS corresp. member *Yu.B.Marin*, acad. *V.P.Matveenko*, acad. *G.A.Mesyats*,
RAS corresp. member *E.V.Pimenov*, RAS corresp. member *V.N.Puchkov*,
Prof. *D.Rosina*, acad. *M.P.Roshchevsky*, Dr. Sci. (Hist.) *E.A.Savelyeva*,
RAS corresp. member *A.F.Titov*, Dr. Sci. (Hist.) *I.Fodor*,
acad. *V.N.Charushin*, Dr. Sci. (Tech.) *N.D.Tskhadaya*

Editorial Office:

Office 317, Komi Science Centre,
Ural Branch, RAS
24, Kommunisticheskayast., Syktyvkar 167982
Tel. +7 8212 244779 Fax +7 8212 242264
E-mail: journal@frc.komisc.ru
www.izvestia.komisc.ru

The "Russian Post" catalogue subscription index 52047

ISSN 1994-5655

Registered by the Russian Federal Surveillance Service
for Compliance with the Law in Mass Communications
and Cultural Heritage Protection. The certificate of mass
media registration – ПИ № ФС 77-26969 dated 11 January,
2007.

*The journal is included in the list of peer-reviewed
scientific publications
of the Higher Attestation Commission
of the Russian Federation*

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Н.А. Громов, В.В. Куратов. Квантовая частица на плоскости Минковского	5
В.Ф. Соколов. Адаптивная субоптимальная стабилизация дискретного минимально-фазового объекта с неопределенностью в канале выхода.....	8
А.В. Жубр. О дифференцировании матричных функций	13
Д.В. Сивков, В.И. Пунегов. Решение обратной задачи рентгеновской дифракции на идеальном кристалле с использованием метода дифференциальной эволюции.....	16
С.В. Некипелов, А.А. Ломов, А.Е. Мингалева, О.В. Петрова, Д.В. Сивков, Н.Н. Шомысов, Е.Н. Шустова, В.Н. Сивков. NEXAFS и XPS исследования пористого кремния	19

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Т.К. Головки, И.В. Далькэ, О.В. Дымова, Р.В. Малышев, С.Н. Плоснина, Т.Н. Пыстина, Н.А. Семенова, Г.Н. Табаленкова, М.А. Шелякин. Функциональная экология лишайника <i>Lobaria Pulmonaria</i> (L.) Hoffm. в таежной зоне на европейском Северо-Востоке России	23
М.Д. Сивков, Е.Н. Патова. Потоки метана на переходном болоте среднетаежной подзоны Республики Коми: результаты трех лет наблюдений	34
В.В. Володин, Ву Тхи Лоан, С.О. Володина, А.Н. Кузнецов. Экидистероидсодержащие растения Национального парка Кук Фьонг (Северный Вьетнам).....	46
Е.А. Моисеева, Р.Х. Бордей, З.А. Самойленко. Перспективы возделывания козлятника восточного (<i>Galega orientalis</i> Lam.) на подзолистых почвах средней тайги Западной Сибири (в условиях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры).....	54
Т.М. Красовская, Г.П. Покрытан. Формирование нового очага загрязнения атмосферы в Российско-Норвежском порубежье.....	60
О.В. Суслонova, С.Л. Смирнова, И.М. Рощевская. Электрическая активность сердца крыс с экспериментальной легочной гипертензией в период реполяризации желудочков.....	66
В.А. Куш, А.С. Гуляева. Кардиоэлектрическое поле на поверхности тела свиньи в период начальной и конечной желудочковой активности.....	70

ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Н.С. Уляшева. Геохимические и петрографические особенности углеродсодержащих пород верхнепротерозойских отложений Полярного Урала.....	75
Д.А. Бушнев, Н.С. Бурдельная, С.В. Лыжов. Геолого-геохимическая характеристика юрских горючих сланцев (обн. Большой Восим, Яренский сланценосный район, Архангельская обл. РФ).....	83

ИСТОРИКО-ФИЛОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ю.П. Шабаев, И.Л. Жеребцов, О.В. Лабунова. Культурная эволюция заполярного города: от города-концлагеря к городу-призраку (II часть).....	88
---	----

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

М.И. Успенский. Оценка воздействия космической погоды на синхронизацию времени в системе мониторинга переходных режимов	95
---	----

ИСТОРИЯ НАУКИ

Т.П. Филиппова, Н.Г. Лисевич. История Воркутинской научно-исследовательской мерзлотной станции в 1930–1950-е гг.	101
---	-----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

В.А. Витязев, В.В. Крандычева, А.И. Цветкова. Сердце жабы с «двумя желудочками».....	111
--	-----

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Х Всероссийский симпозиум по исторической демографии (с международным участием).....	114
«Селекционер милостью Божьей» (Памяти З.Г.Зиновьевой)	116

ЮБИЛЕИ	118
--------------	-----

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

N.A. Gromov, V.V. Kuratov. Quantum particle on Minkowski plane	5
V.F. Sokolov. Adaptive suboptimal stabilization of discrete-time minimum-phase plant under output uncertainty	8
A.V. Zhubr. On differentiating matrix functions	13
D.V. Sivkov, V.I. Punegov. Solution of the inverse problem of X-ray diffraction on an ideal crystal using the differential evolution method	16
S.V. Nekipelov, A.A. Lomov, A.E. Mingaleva, O.V. Petrova, D.V. Sivkov, N.N. Shomysov, E.N. Shustova, V.N. Sivkov. NEXAFS and XPS studies of porous silicon	19

BIOLOGICAL SCIENCES

T.K. Golovko, I.V. Dal'ke, O.V. Dymova, R.V. Malyshev, S.N. Plyusnina, T.N. Pystina, N.A. Semenova, G.N. Tabalenkova, M.A. Shelyakin. Functional ecology of lichen <i>Lobaria pulmonaria</i> [L.] Hoffm. in the taiga zone in the European Northeast of Russia	23
M.D. Sivkov, E.N. Patova. Methane fluxes from the transitional swamp in the middle taiga zone of the Komi Republic: results of three-year observations	34
V.V. Volodin, Vu Thi Loan, S.O. Volodina, A.N. Kuznetsov. Ecdysteroid-containing plants of the National Park Cuc Phuong (Northern Vietnam)	46
E.A. Moiseeva, R.Kh. Bordey, Z.A. Samoilenko. Prospects of Eastern Galega (<i>Galega Orientalis</i> Lam.) cultivation on podzolic soils of Western Siberia middle taiga (in conditions of Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra)	54
T.M. Krasovskaya, G.P. Pokrytan. The formation of a new source of atmosphere pollution in the Norwegian-Russian borderline region	60
O.V. Suslonova, S.L. Smirnova, I.M. Roshchevskaya. Cardiac electric activity in rats with experimental pulmonary hypertension during ventricular repolarization	66
V.A. Kushch, A.S. Gulyaeva. Cardioelectric field on the body surface of pig during initial and final ventricular activity	70

GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES

N.S. Ulyasheva. Petrographic and geochemical peculiarities of carbonaceous rocks of the Upper Proterozoic deposits of the Polar Urals	75
D.A. Bushnev, N.S. Burdelnaya, S.V. Lyyurov. Of the Jurassic oil shales (Bolshoi Vosim river outcrop, Yarengsk shale-bearing area, Arkhangelsk Region, Russian Federation)	83

HISTORICAL AND PHILOLOGICAL SCIENCES

Yu.P. Shabaev, I.L. Zherebtsov, O.V. Labunova. Cultural evolution of the Polar town: from the town-concentration camp to the ghost town (part II)	88
---	----

TECHNICAL SCIENCES

M.I. Uspensky. Space weather impact estimate on synchronization for WAMS	95
--	----

HISTORY OF SCIENCE

T.P. Filippova, N.G. Lisevich. The history of the Vorkuta Permafrost Research Station in the 1930-s–1950-s	101
--	-----

PAPERS-IN-BRIEF

V.A. Vityazev, V.V. Krandycheva, A.S. Tsvetkova. A toad heart with “two ventricles”	111
---	-----

SCIENCE NEWS

X All-Russian Symposium on historical demography (with international participation)	114
“Plant breeder by the grace of God” (in memory of Z.G. Zinovyeva)	116

ANNIVERSARIES	118
---------------------	-----

КВАНТОВАЯ ЧАСТИЦА НА ПЛОСКОСТИ МИНКОВСКОГО

Н. А. ГРОМОВ, В. В. КУРАТОВ

Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

gromov@dm.komisc.ru, kuratov@dm.komisc.ru

Рассмотрена задача о поведении нерелятивистской квантовой частицы, у которой собственное пространство представляет собой плоскость Минковского с потенциальными барьерами бесконечной высоты на изотропных прямых. В отличие от стандартной задачи с евклидовой плоскостью, у частицы помимо непрерывного спектра появляются дискретные уровни энергии.

Ключевые слова: плоскость Минковского, уравнение Шредингера, свободная частица

N. A. GROMOV, V. V. KURATOV. QUANTUM PARTICLE ON MINKOWSKI PLANE

The problem of nonrelativistic quantum particle on Minkowski plane is discussed. The corresponding Schrödinger equation for eigenstates is obtained with the help of Beltrami-Laplace operator of pseudoeuclidean plane. The infinitely high potential barriers are placed on isotropic lines. In contrast to the standard problem on euclidean plane where there is only continuous energy spectrum, the particle on Minkowski plane has discrete energy eigenvalues as well.

Keywords: Minkowski plane, Schrödinger equation, free particle

Введение

По мере развития нанотехнологий появилась возможность создания новых материалов на основе метатомов, т. е. искусственных структур более или менее простой формы размером в несколько нанометров [1]. В частности, получены материалы, которые демонстрируют свойства металла в одном направлении и ведут себя подобно диэлектрику в ортогональном направлении. Они получили название гиперболических метаматериалов [2, 3]. Действительно, именно в пространствах с псевдоримановой метрикой имеется два типа прямых (помимо изотропных), которые не совмещаются изоморфизмами и поэтому позволяют моделировать две разные физические сущности в рамках одного пространства [4, 5].

Бурное развитие метаматериалов в последние несколько лет, заманчивые перспективы их практического применения в самых разных областях стимулируют теоретические исследования поведения частиц в пространствах с нетрадиционной метрикой. В настоящей заметке рассмотрена простейшая задача об уровнях энергии нерелятивистской квантовой частицы, у которой собственное пространство представляет собой плоскость Минковского. Для предотвращения смешивания разных типов прямых на изотропных прямых помещены потенциальные барьеры

бесконечной высоты. В отличие от стандартной задачи с евклидовой плоскостью, где частица имеет только непрерывный спектр, в случае плоскости Минковского у нее дополнительно появляются дискретные уровни энергии.

1. Полярные координаты

Плоскость Минковского – двумерное пространство нулевой кривизны с псевдоевклидовой метрикой $s^2 = x_1^2 - x_2^2$ в декартовых координатах. Декартовы и полярные координаты в областях I ($x_1^2 - x_2^2 > 0, x_1 > 0$) и II ($x_1^2 - x_2^2 > 0, x_1 < 0$) связаны формулами (см. рисунок)

$$\begin{cases} x_1 = \pm r \operatorname{ch} \varphi \\ x_2 = \pm r \operatorname{sh} \varphi \end{cases} \quad \begin{cases} \operatorname{tgr} = \sqrt{x_1^2 - x_2^2} > 0, \\ \operatorname{th} \varphi = x_2/x_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $r \in [0, \infty)$, $\varphi \in \mathbf{R}$.

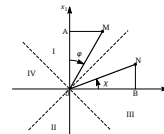


Рис. Полярные координаты $\{r, \varphi\}$ точки M и координаты $\{\rho, \chi\}$ точки N на плоскости Минковского. $OM=r$, $ON=\rho$.

Fig. Polar coordinate $\{r, \varphi\}$ of point M and coordinate $\{\rho, \chi\}$ of point N on Minkowski plane.

В областях III ($x_1^2 - x_2^2 < 0$, $x_2 > 0$) и IV ($x_1^2 - x_2^2 < 0$, $x_2 < 0$) вместо мнимого r вводим вещественный радиус $\rho = \sqrt{x_2^2 - x_1^2}$, т.е. $r = i\rho$, и новый угол χ , отсчитываемый теперь от оси x_2 и связанный с углом φ соотношением $\varphi = \chi - i\frac{\pi}{2}$, тогда

$$\begin{cases} x_1 = \pm \rho \operatorname{sh} \chi \\ x_2 = \pm \rho \operatorname{ch} \chi, \end{cases} \quad \begin{cases} \operatorname{th} \rho = \sqrt{x_2^2 - x_1^2} > 0, \\ \operatorname{th} \chi = x_1/x_2, \end{cases} \quad (2)$$

где $\rho \in [0, \infty)$, $\chi \in \mathbf{R}$.

2. Квантово-механическое поведение частицы

Для уравнения Шредингера в области I в полярных координатах

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) \Psi(r, \varphi) = E \Psi(r, \varphi) \quad (3)$$

с граничными условиями $\Psi(0, \varphi) = \Psi(\infty, \varphi) = 0$ ищем решение в виде

$$\Psi(r, \varphi) = \frac{u(r)}{\sqrt{r}} e^{iM\varphi}, \quad (4)$$

где функция $u(r)$ удовлетворяет уравнению

$$u'' + \left(\frac{2mE}{\hbar^2} + \frac{M^2 + \frac{1}{4}}{r^2} \right) u = 0 \quad (5)$$

с эффективным потенциалом притяжения

$$U_{eff}(r) = \begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{M^2 + \frac{1}{4}}{r^2}, & r > 0, \\ \infty, & r = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, предполагается, что на изотропных прямых находится бесконечно высокий потенциальный барьер, который препятствует уходу частицы из области I. Одномерная задача (5) с сингулярным потенциалом рассматривалась в работе [6], §35, где, правда, отмечено, что она не имеет непосредственного физического смысла. Приводимая в данной заметке интерпретация придает ей определенный физический смысл. Подробное решение этой и подобных задач с сингулярным потенциалом дано также в работах [7, 8].

При малых r волновая функция u ведет себя как [7, формула (26)]

$$\begin{aligned} u(r) &\sim \sqrt{r} (Ar^{iM} + Br^{-iM}) \sim \\ &\sim \sqrt{r} (r^{iM} - e^{-2i\gamma} r^{-iM}) \sim \sqrt{r} \sin(M \ln r + \gamma), \end{aligned} \quad (7)$$

поскольку при малых r уравнение (5) имеет вид

$$u'' + \frac{M^2 + \frac{1}{4}}{r^2} u = 0 \quad (8)$$

с решениями в виде суперпозиции функций $r^{\frac{1}{2}+iM}$ и $r^{\frac{1}{2}-iM}$. Здесь γ – фаза отражения от сингулярности $r = 0$ ($0 \leq \gamma < \pi$).

Дискретный спектр существует при отрицательных значениях энергии E , поэтому удобно обозначить

$$\eta^2 = -\frac{2mE}{\hbar^2}. \quad (9)$$

Асимптотически при больших r убывающее на бесконечности решение уравнения (5) ведет себя как $u(r) \sim e^{-\eta r}$. Поэтому можно искать его решение в виде

$$u(r) = r^{\frac{1}{2}+iM} e^{-\eta r} f(r). \quad (10)$$

Тогда для функции $f(r)$ получаем уравнение

$$r f'' + (2iM + 1 - 2\eta r) f' - 2\eta \left(\frac{1}{2} + iM \right) u = 0, \quad (11)$$

частными решениями которого будут вырожденные гипергеометрические функции

$$\begin{aligned} &F \left(iM + \frac{1}{2}, 2iM + 1, 2\eta r \right), \\ &(2\eta r)^{-2iM} F \left(\frac{1}{2} - iM, 1 - 2iM, 2\eta r \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Общее решение уравнения (5) дается линейной комбинацией

$$u(r) = C_1 u_1 + C_2 u_2 = C (u_1 - e^{-2i\gamma} u_2) \quad (13)$$

функций

$$\begin{aligned} u_1 &= e^{-\eta r} \sqrt{r} r^{iM} F \left(iM + \frac{1}{2}, 2iM + 1, 2\eta r \right), \\ u_2 &= e^{-\eta r} \sqrt{r} r^{-iM} F \left(\frac{1}{2} - iM, 1 - 2iM, 2\eta r \right). \end{aligned} \quad (14)$$

При малых r функция $u(r)$ стремится к нулю (7), но ее производная — к бесконечности. Поэтому немного модифицируем граничное условие при $r = 0$. Выпишем уравнения (5) для разных значений E

$$u_1'' + \left(\frac{2mE_1}{\hbar^2} + \frac{M^2 + \frac{1}{4}}{r^2} \right) u_1 = 0, \quad (15)$$

$$u_2'' + \left(\frac{2mE_2}{\hbar^2} + \frac{M^2 + \frac{1}{4}}{r^2} \right) u_2 = 0. \quad (16)$$

Умножим первое уравнение на u_2 , второе — на u_1 , вычтем второе из первого и проинтегрируем от нуля до бесконечности

$$\int_0^\infty (u_1 u_2'' - u_2 u_1'') dr = \frac{2m}{\hbar^2} (E_2 - E_1) \int_0^\infty u_1 u_2 dr. \quad (17)$$

Воспользовавшись равенством

$$(u_1 u_2'' - u_2 u_1'') = (u_1 u_2' - u_2 u_1')' \quad (18)$$

и ортогональностью функций u_1 и u_2 , получаем

$$(u_1 u_2' - u_2 u_1')|_0^\infty = 0. \quad (19)$$

На бесконечности и сама функция и ее производная стремятся к нулю, а в точке $r = 0$ имеем

$$(u_1 u_2' - u_2 u_1')|_0 \sim \sin(\gamma(E_1) - \gamma(E_2)). \quad (20)$$

Откуда следует условие квантования

$$\gamma(E_1) - \gamma(E_2) = \pi n. \quad (21)$$

При $r \rightarrow \infty$ вырожденная гипергеометрическая функция имеет асимптотику

$$F(a, b; z) \underset{\operatorname{Re} z \rightarrow \infty}{\sim} \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(a)} e^z z^{a-c}. \quad (22)$$

Поэтому волновая функция (13) ведет себя в этом пределе как

$$u(r) \sim e^{\eta r} \left(e^{-i(M \ln \eta)} \frac{\Gamma(1 + 2iM)}{\Gamma(i + iM)} - e^{i(M \ln \eta - 2i\gamma)} \frac{\Gamma(1 - 2iM)}{\Gamma(1 - iM)} \right), \quad (23)$$

тогда из условия $u(\infty) = 0$ находим

$$e^{i(2M \ln \eta - 2\gamma)} = \frac{\Gamma(1 + 2iM) \Gamma(1 - iM)}{\Gamma(1 - 2iM) \Gamma(1 + iM)}, \quad (24)$$

откуда

$$\gamma(E) = M \ln \eta + C(M). \quad (25)$$

Подставляя в (21), получаем дискретный спектр энергий

$$E_n = E_0 e^{\frac{2\pi n}{M}}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad E_0 < 0, \quad (26)$$

что совпадает с формулой (34) в [7]. При увеличении n расстояние между уровнями растет и дискретный спектр при $E \rightarrow -\infty$ становится все более редким. Для положительных энергий $E > 0$ спектр непрерывный.

В области III уравнение Шредингера в переменных ρ, χ записывается в виде (3) со знаком плюс в левой части. Если вновь искать решение в виде (4), то приходим к уравнению Шредингера (5) на полуоси $\rho \in (0, \infty)$ с энергией $\mathcal{E} = -E$ и эффективным потенциалом вида (6). По-прежнему на изотропных прямых находится бесконечно высокий потенциальный барьер, который препятствует переходу частицы из области III в какую-либо другую область плоскости Минковского. В области III дискретный спектр будет при положительных энергиях, а непрерывный – при отрицательных.

Замечание. Общий случай комплексной фазы

$$\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2, \quad 0 \leq \gamma_1 < \pi, \quad \gamma_2 \geq 0 \quad (27)$$

отвечает варианту “полупрозрачного” барьера (с регулируемой высотой “стенки”) на изотропных прямых. Тогда возникают интересные решения, связанные с туннелированием (или просачиванием) из области I в область III и обратно. Случай $\gamma_2 \rightarrow \infty$ отвечает полному поглощению частицы на изотропной прямой, что можно толковать как переход частицы в область III.

Авторы благодарны И.В. Костякову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 18-1-1-7.

Литература

1. Ремнев М.А., Климов В.В. Метаповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. №2. С. 169–205.

2. Smolyaninov I.I. Modelling of causality with metamaterials // J. Optics. 2013. Vol. 15. No. 2. 025101; arXiv:1210.5628.
3. Smolyaninov I.I. Hyperbolic metamaterials; arXiv:1510.07137.
4. Пименов Р.И. Единая аксиоматика пространств с максимальной группой движений // Литовский матем. сб. 1966. Т. 5. № 3. С. 457–486.
5. Громов Н.А. Контракции классических и квантовых групп. М.: Физматлит, 2012. 320 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. (Серия: “Теоретическая физика”. Т. III). М.: Наука, 1974. 752 с.
7. Переломов А.М., Попов В.С. “Падение на центр” в квантовой механике // Теор. матем. физика. 1970. Т. 4. № 1. С.48–65.
8. Case K.M. Singular potentials // Phys. Rev. 1950. Vol.80. P. 797–806.

References

1. Remnev M.A., Klimov V.V. Metapoverhnosti: novyy vzglyad na uravneniya Maksvela i novyye metody upravleniya svetom [Metasurfaces: a new look at Maxwell's equations and new ways to control light] // Uspekhi Fizicheskikh Nauk [Advances in Physics]. 2018. Vol. 188. №2. P. 169–205.
2. Smolyaninov I.I. Modelling of causality with metamaterials // J. Optics. 2013. Vol. 15. No. 2. 025101; arXiv:1210.5628.
3. Smolyaninov I.I. Hyperbolic metamaterials; arXiv:1510.07137.
4. Pimenov R.I. Edinaya aksiomatika prostranstv s maksimal'noy gruppoy dvizheniy [Unified axiomatics of spaces with maximal motion group] // Litovskiy matem. sb. [Lithuanian math. collection]. 1966. Vol. 5. № 3. P. 457–486.
5. Gromov N.A. Kontraktsii klassicheskikh i kvantovykh grupp [Contractions of classical and quantum groups]. Moscow, FIZMATLIT, 2012. 320 p.
6. Landau L.D., Lifshitz E.M. Kvantovaya mehanika. Nerelyativistskaya teoriya. (Seriya: “Teoreticheskaya fizika” t. III) [Quantum mechanics. Nonrelativistic theory. (Series: “Theoretical physics”). Vol. III]. Moscow: Nauka, 1974. 752 c.
7. Perelomov A.M., Popov V.S. “Padenie na tsentr” v kvantovoy mehanike [Collapse onto scattering centre in quantum mechanics] // Teor. matem. fizika [Theor. mathem. phys.]. 1970. Vol. 4. No. 1. P.48–65.
8. Case K.M. Singular potentials // Phys. Rev. 1950. Vol.80. P. 797–806.

Статья поступила в редакцию 30.03.2018.

УДК 517.977 + 62-50
DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-8-12

АДАПТИВНАЯ СУБОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНОГО МИНИМАЛЬНО-ФАЗОВОГО ОБЪЕКТА С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ В КАНАЛЕ ВЫХОДА

В.Ф. СОКОЛОВ

Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
sokolov@dm.komisc.ru

Рассматривается задача адаптивной оптимальной стабилизации дискретного минимально-фазового объекта с неопределенностью в канале выхода. Для оптимального онлайн оценивания неидентифицируемых параметров объекта и неизвестных верхних границ неопределенности и внешнего ограниченного возмущения используются их конусные оценки. Использование простых конусных оценок для синтеза адаптивного субоптимального управления оказывается возможным благодаря тому, что показатель качества в задаче стабилизации является дробно-рациональной функцией неизвестных конструктору системы управления верхних границ внешнего возмущения и неопределенности. Конусное оценивание базируется на методе рекуррентных целевых неравенств, обеспечивающем дополнительно онлайн верификацию используемой для синтеза управления модели.

Ключевые слова: адаптивное управление, оптимальное управление, робастное управление, онлайн верификация модели, ограниченное возмущение

V.F. SOKOLOV. ADAPTIVE SUBOPTIMAL STABILIZATION OF DISCRETE-TIME MINIMUM-PHASE PLANT UNDER OUTPUT UNCERTAINTY

The paper addresses the problem of adaptive suboptimal stabilization of linear, time-invariant discrete-time minimum-phase plant under output uncertainty and bounded exogenous disturbance. The control criterion is taken in the form of the worst-case upper limit of the absolute value of the plant output. The parameters of the plant, the upper bound on the disturbance, and the induced norm of the uncertainty are assumed to be not known to the designer. Conventional gradient or projection type estimation algorithms are of no use in this problem in view of the non-identifiability of the unknown parameters of the plant as well as the upper bounds on the disturbance and the uncertainty. The statement of the problem is based on the known results in the theory of robust control in the ℓ_1 setup, and the solution of the problem is based on set-membership approach and optimal estimation where the identification criterion is taken in the form of the control criterion. The control criterion in the specific problem under consideration is a linear-fractional function of the upper bounds on the disturbance and the uncertainty. This peculiarity enables use of simple cone estimates composed of p linear inequalities with respect to p estimated parameters and reduces online optimal estimation to the selection of the best estimate among p candidate estimates. Cone estimates are based on the method of recurrent objective inequalities and additionally provide online model validation.

Keywords: adaptive control, optimal control, model uncertainty, online model validation, bounded disturbance

1. Введение

Рассматривается задача адаптивной оптимальной стабилизации линейного стационарного дискретного минимально-фазового объекта с ограниченным внешним возмущением и неопределенностью в канале выхода. В силу неидентифицируемости параметров объекта и верхних границ неопределенности и внешнего возмущения для ее решения не пригодны традиционные методы синтеза робастно-

го адаптивного управления [1], основанные на градиентных и проекционных алгоритмах оценивания. Постановка задачи адаптивной оптимальной стабилизации базируется на результатах теории робастного управления в ℓ_1 -постановке [2, 3], а ее решение требует использования множественного оценивания неизвестных параметров и оптимального оценивания, в котором идентификационным критерием служит показатель качества задачи управления [4]. Специфика рассматриваемой в статье проблемы за-

ключается в том, что показатель качества в задаче оптимальной стабилизации является дробно-рациональной функцией верхних границ внешнего возмущения и неопределенности в канале выхода. Это обстоятельство позволяет, во-первых, использовать максимально простые конусные оценки неизвестных параметров и, во-вторых, сводит задачу онлайн оптимизации оценок к выбору наилучшей оценки из p кандидатов, где p – число оцениваемых параметров. Конусный алгоритм оценивания был предложен в [5] для задач с линейными показателями качества и обобщается в данной работе на задачу с дробно-рациональным показателем качества. Линейные неравенства для конусных оценок основаны на методе рекуррентных целевых неравенств [6] и обеспечивают дополнительно онлайн верификацию настроенной модели.

2. Постановка задачи

Пусть объект управления описывается моделью

$$y_t + a_1 y_{t-1} + \dots + a_n y_{t-n} = b_1 u_{t-1} + \dots + b_m u_{t-m} + v_t, \quad t = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где вещественные числа y_t, u_t, v_t обозначают соответственно выход объекта, управление и суммарное возмущение в момент времени t . Введем обозначение q^{-1} для оператора сдвига назад ($q^{-1}x_t := x_{t-1}$) и определим полиномы

$$a(\lambda) = 1 + a_1 \lambda + \dots + a_n \lambda^n,$$

$$b(\lambda) = b_1 + b_2 \lambda + \dots + b_m \lambda^{m-1}.$$

В этих обозначениях уравнение модели (1) принимает вид

$$a(q^{-1})y(t) = q^{-1}b(q^{-1})u(t) + v(t).$$

Априорная информация об объекте состоит из предположений **A1**, **A2**.

A1. Неизвестный столбец коэффициентов модели

$$\xi := (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m)^T$$

принадлежит известному ограниченному многограннику

$$\xi \in \Xi = \{ \hat{\xi} \mid P \hat{\xi} \geq p \} \subset \mathbb{R}^{n+m}, \quad P \in \mathbb{R}^{l \times (n+m)}, \quad (2)$$

$b_1 \neq 0$ для любого ξ из Ξ и корни полинома

$$b(\lambda) = b_1 + b_2 \lambda + \dots + b_m \lambda^{m-1}$$

лежат вне замкнутого единичного круга $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1\}$ (такие полиномы называются устойчивыми, а соответствующие им модели – *минимально-фазовыми*).

A2. Суммарное возмущение v имеет вид

$$v = w + \delta_y \Delta y, \quad (3)$$

где $w \in \ell_\infty$ – неизвестное конструктору внешнее возмущение с неизвестной нормой

$$\delta_w := \|w\| := \sup_t |w_t|, \quad (4)$$

Δ – неизвестный строго причинный оператор на ℓ_∞ , удовлетворяющий при всех t ограничению

$$|(\Delta y)(t)| \leq p_y(t) := \max_{t-\mu \leq s < t} |y_s|. \quad (5)$$

Оператор Δ называется *нормированной неопределенностью (или операторным возмущением)* в канале выхода. Предполагается известной верхняя граница $\bar{\delta}_y < 1$ неизвестного коэффициента усиления неопределенности δ_y :

$$0 \leq \delta_y \leq \bar{\delta}_y < 1.$$

Параметр μ в неравенстве (5) характеризует память неопределенности Δ и может быть выбран сколь угодно большим, но не бесконечным, без ущерба для гарантируемого качества управления. Ограниченность памяти возмущений обеспечивает независимость асимптотического качества замкнутой системы управления от начальных данных [3], что необходимо для синтеза адаптивного управления.

Для модели с известным вектором коэффициентов ξ и любыми начальными значениями $y_0, \dots, y_{-n+1}, u_0, \dots, u_{-m+1}$ регулятор

$$b(q^{-1})u_t = (a(q^{-1}) - 1)y_{t+1} \quad (6)$$

обеспечивает равенство $y_{t+1} = v_{t+1}$ и тем самым гарантирует минимизацию показателя качества

$$J_\mu(\delta_y, \delta_w) := \sup_{\Delta} \sup_w \limsup_{t \rightarrow +\infty} |y_t|,$$

где супремумы берутся по возмущениям w и неопределенностям Δ , удовлетворяющим предположению **A2**. Точная верхняя оценка показателя $J_\mu(\delta_y, \delta_w)$ при $\mu \rightarrow +\infty$ следует из теорем 6 и 8 [3]:

$$J_\mu(\delta_y, \delta_w) \nearrow \frac{\delta_w}{1 - \delta_y} \quad (\mu \rightarrow +\infty), \quad \delta_y < 1, \quad (7)$$

где знак $\nearrow$ означает монотонную сходимость снизу. Верхняя оценка (7) характеризует качество стабилизации для объекта с известным вектором коэффициентов ξ .

Задача. При априорной информации **A1, A2** требуется построить обратную связь для модели (1), гарантирующую с наперед заданной точностью неравенство

$$\sup_{\Delta} \sup_w \limsup_{t \rightarrow +\infty} |y_t| \leq J(\delta_y, \delta_w) := \frac{\delta_w}{1 - \delta_y} \quad (8)$$

для модели с неизвестным вектором коэффициентов ξ при неизвестных конструктору δ_y, δ_w .

Поставленная задача является задачей *адаптивного субоптимального управления с показателем качества* $J(\delta_y, \delta_w)$. Ее сложность заключается в том, что адаптивный регулятор должен гарантировать с заданной точностью то же качество управления, что и для известной модели в условиях неидентифицируемости вектора коэффициентов ξ и верхних границ δ_y и δ_w . Поскольку даже желаемое оптимальное значение $J(\delta_y, \delta_w)$ показателя качества неизвестно конструктору, для решения задачи необходимо онлайн оценивание не только вектора коэффициентов ξ , но и норм возмущения и неопределенности.

3. Адаптивное субоптимальное управление

Для решения поставленной задачи будем оценивать по данным измерений вектор неизвестных параметров модели

$$\theta = (\xi^T, \delta_y, \delta_w)^T \in \mathbb{R}^{n_\theta}, \quad n_\theta = n + m + 2.$$

Из уравнения модели и предположения **A2** следуют неравенства

$$|a(q^{-1})y_t - q^{-1}b(q^{-1})u_t| \leq \delta_w + \delta_y p_y(t), \quad t \in \mathbb{N}, \quad (9)$$

несущие информацию о неизвестном векторе θ . Можно показать, что система неравенств (9) эквивалентна уравнению модели (1) с предположением **A2**, т.е. если для некоторого вектора θ и последовательностей y и u выполнены неравенства (9), то существуют удовлетворяющие предположению **A2** возмущение w и оператор Δ , при которых справедливо уравнение (1). Каждое из неравенств (9) представляет собой пару линейных неравенств относительно вектора θ . Для произвольного вектора θ в момент времени t может нарушаться только одно из этих линейных неравенств, и именно нарушаемые неравенства будут задействованы в алгоритме оценивания. Введем обозначения

$$\theta_t = (\xi_t^T, \delta_{yt}, \delta_{wt})^T$$

для векторной оценки неизвестного вектора θ в момент времени t ,

$$\begin{aligned} \phi_t &:= (-y_t, -y_{t-1}, \dots, -y_{t-n+1}, u_t, \dots, u_{t-m+1})^T, \\ \eta_{t+1} &:= \text{sign}(y_{t+1} - \phi_t^T \xi_t), \\ \psi_{t+1} &:= (\eta_{t+1} \phi_t^T, p_y(t), 1)^T, \\ \zeta_{t+1} &:= \eta_{t+1} y_{t+1}. \end{aligned}$$

Неравенство (9) относительно θ_t в момент времени $t+1$ эквивалентно неравенству

$$\eta_{t+1}(y_{t+1} - \phi_t^T \xi_t) \leq \delta_{wt} + \delta_{yt} p_y(t)$$

и может быть переписано в виде

$$\psi_{t+1}^T \theta_t \geq \zeta_{t+1}.$$

Таким образом, для выполнения неравенства (9) в момент $t+1$ необходимо и достаточно, чтобы оценка θ_t удовлетворяла линейному неравенству

$$\psi_{t+1}^T \hat{\theta} \geq \zeta_{t+1}, \quad \hat{\theta} \in \mathbb{R}^{n_\theta}. \quad (10)$$

Если неравенства (10) выполняются для не изменяющейся оценки θ_t при всех достаточно больших t , то выход y и управление u удовлетворяют уравнению модели (1) с вектором параметров θ_t и тогда регулятор (6), соответствующий вектору коэффициентов ξ_t , гарантирует в силу (7) справедливость неравенства

$$\limsup_{t \rightarrow +\infty} |y_t| \leq J(\delta_{yt}, \delta_{wt}).$$

Следовательно, для достижения цели управления (8) достаточно гарантировать выполнение неравенств

$$J(\delta_{yt}, \delta_{wt}) \leq J(\delta_y, \delta_w) \quad (11)$$

с неизвестными δ_y и δ_w . Этого можно достичь применением множественного оценивания и выбором наилучших точечных оценок в множественных оценках.

В качестве множественных мы будем использовать максимально простые конусные оценки, а в качестве оптимальных точечных оценок – вершины конусов. Введем обозначение

$$\Theta := \{ \hat{\theta} = (\hat{\xi}^T, \hat{\delta}_y, \hat{\delta}_w)^T \mid$$

$$P\hat{\xi} \geq p, \bar{\delta}_y \geq \hat{\delta}_y \geq 0, \hat{\delta}_w \geq 0 \} \quad (12)$$

для априорного множества допустимых значений вектора θ . Показатель качества J будем рассматривать как функционал на априорном множестве Θ :

$$I(\hat{\theta}) := J(\hat{\delta}_y, \hat{\delta}_w) = \frac{\hat{\delta}_w}{1 - \hat{\delta}_y}, \quad \hat{\theta} \in \Theta.$$

Использование простых конусных оценок для обеспечения неравенства (11) оказывается возможным благодаря тому, что

$$I(\hat{\theta}) = C \Leftrightarrow C\hat{\delta}_y + \hat{\delta}_w = C, \quad (13)$$

т.е. поверхностями уровня дробно-рациональной функции I являются полосы $\bar{\delta}_y \geq \delta_y \geq 0, \delta_w \geq 0$ на гиперплоскостях $\hat{\delta}_w + C\hat{\delta}_y = C$ в $\mathbb{R}^{n_\theta}$. В каждый момент времени t конусная оценка C_t будет иметь вид

$$C_t = \{ \hat{\theta} \mid \Psi_t \hat{\theta} \geq Z_t \}, \quad \Psi_t \in \mathbb{R}^{n_\theta \times n_\theta}, \det \Psi_t \neq 0, \quad (14)$$

в котором каждое из n_θ скалярных неравенств является одним из неравенств (10), полученных до момента $t+1$, или неравенством из описания (12) априорного множества Θ . Представление (14) можно переписать в виде

$$C_t = \{ \hat{\theta} = \theta_t + \Psi_t^{-1} \lambda \mid \lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{n_\theta})^T \geq 0 \}, \quad (15)$$

где

$$\theta_t := \Psi_t^{-1} Z_t$$

– вершина конуса C_t , а столбцы матрицы Ψ_t^{-1} – его ребра. Обозначим через e_k^t нормированное k -ое ребро конуса и перепишем представление (15) в виде

$$C_t = \{ \hat{\theta} = \theta_t + \sum_{k=1}^n \lambda_k e_k^t \mid \lambda_k \geq 0, |e_k| = 1 \forall k \}. \quad (16)$$

В (16) и далее $|x|$ обозначает евклидову норму вектора x . В качестве начального конуса C_0 выбирается конус с вершиной $(\xi_0^T, 0, 0)^T$, $\xi_0 \in \Xi$, составленный из $n+m$ линейно независимых неравенств из априорной системы неравенств (2) и двух неравенств $\hat{\delta}_y \geq 0, \hat{\delta}_w \geq 0$ (все неравенства рассматриваются относительно расширенного вектора параметров $\hat{\theta}$).

Конус C_t обновляется в момент $t+1$ по следующему алгоритму. Выберем параметр мертвой зоны $\varepsilon > 0$ и положим

$$\theta_{t+1} := \theta_t, \quad C_{t+1} := C_t,$$

$$\text{если } \psi_{t+1}^T \theta_t \geq \zeta_{t+1} - \varepsilon |\psi_{t+1}|. \quad (17)$$

В противном случае новые оценки находятся следующим образом. Обозначим через Ω_{t+1} полупространство, задаваемое неравенством (10):

$$\Omega_{t+1} := \{ \hat{\theta} \mid \psi_{t+1}^T \hat{\theta} \geq \zeta_{t+1} \}$$

и положим

$$\theta_{t+1} := \underset{\hat{\theta} \in C_t \cap \Omega_{t+1} \cap \Theta}{\operatorname{argmin}} I(\hat{\theta}), \quad (18)$$

где θ_{t+1} – вершина многогранника $C_t \cap \Omega_{t+1} \cap \Theta$, являющаяся решением задачи дробно-линейного программирования (18). Вершина θ_{t+1} является точкой пересечения границ n_θ линейных неравенств из описания множества $C_t \cap \Omega_{t+1} \cap \Theta$, которые и задают обновленный конус C_{t+1} .

Во избежание заикливания в случае не единственности выбора вершины θ_{t+1} в (18) уточним этот выбор следующей лексикографической процедурой. Положим

$$n_{t+1} := (0, \dots, 0, I(\theta_{t+1}), 1)^T \quad (19)$$

– вектор нормали к гиперплоскости $\{ \theta \mid I(\theta) = I(\theta_{t+1}) \}$. Дополним нормированный вектор $c_1 := n_{t+1} / \|n_{t+1}\|$ до ортонормированного базиса $c_1, c_2, \dots, c_{n_\theta}$ пространства $\mathbb{R}^{n_\theta}$. Если вершина, доставляющая решение задачи (18), не единственна, выберем ту из них, на которой достигается минимум дополнительного линейного функционала $c_2^T \theta$ (в случае очередной неоднозначности – еще одного дополнительного линейного функционала $c_3^T \theta$ и т.д.).

Необходимые для синтеза адаптивного управления свойства конусного алгоритма сформулированы в следующей лемме.

Лемма 1. Пусть объект управления удовлетворяет уравнению модели (1) и выполнены предположения **A1**, **A2** с неизвестным вектором параметров $\theta = (\xi^T, \delta_y, \delta_w)^T$. Пусть $u_1, u_2, \dots$ – произвольная последовательность управлений при любых начальных значениях $y_0, \dots, y_{-n+1}, u_0, \dots, u_{-m+1}$, и последовательность конусов C_t с вершинами θ_t вычисляется согласно описанному выше алгоритму с параметром мертвой зоны $0 < \varepsilon < 1 - \bar{\delta}_y$. Тогда

$$I(\theta_t) \nearrow I_\infty \leq I(\theta) = \frac{\delta_w}{1 - \delta_y} \quad (t \rightarrow +\infty). \quad (20)$$

Если существует $\varepsilon_* > 0$ и индекс k_* такие, что при всех достаточно больших t выполнены неравенства

$$n_{t+1}^T e_{k_*}^t \geq \varepsilon_* \quad (21)$$

и в описание конусов C_t не входят априорные ограничения (12), то число обновлений конусов C_t и оценок θ_t конечно, и для финальной оценки θ_∞ выполнены неравенства

$$\psi_{t+1}^T \theta_\infty \geq \zeta_{t+1} - \varepsilon |\psi_{t+1}|. \quad (22)$$

Доказательство. Докажем сначала справедливость (20). Из алгоритма обновления конусов C_t следует, что для всех t

$$I(\theta_t) = \min_{\hat{\theta} \in C_t} I(\hat{\theta})$$

и тогда из (18) и включения $C_t \subset C_t \cap \Omega_{t+1} \cap \Theta$ следует

$$I(\theta_t) \leq I(\theta_{t+1}).$$

Поскольку вектор $\theta \in \Theta$ удовлетворяет неравенствам (10), т.е. $\theta \in \Omega_t$ при всех t , то $\theta \in C_t$ и, следовательно,

$$I(\theta_t) \leq I(\theta)$$

при всех t . Из возрастания и ограниченности последовательности $I(\theta_t)$ следует справедливость (20).

Справедливость неравенств (22) при выполнении неравенств (21) при всех достаточно больших t докажем индукцией по размерности n_θ . Не уменьшая общности, случай $n_\theta = 1$ можно считать соответствующим задаче, в которой неизвестна только одна из верхних границ δ_y или δ_w и известен вектор коэффициентов ξ (при этом следует должным образом переопределить ψ_{t+1} и ζ_{t+1}). В этом случае все конусы C_t имеют вид $[\theta_t, +\infty)$. Условие

$$\psi_{t+1}^T \theta_t < \zeta_{t+1} - \varepsilon |\psi_{t+1}| \quad (23)$$

изменения оценок θ_t означает, что расстояние от θ_t до множества Ω_{t+1} больше ε и, следовательно, оценки θ_t монотонно возрастают на величину не меньше ε при каждом своем изменении. С другой стороны, последовательность θ_t ограничена, т.к. неравенства (9) заведомо выполняются (и тем самым неравенства (23) не выполняются), если оценка δ_{yt} или δ_{wt} превышает δ_y или δ_w соответственно. Из этого следует, что число изменений оценок θ_t конечно и при всех достаточно больших t выполнены неравенства (22).

Предполагая, что число обновлений конусов конечно для размерности $n_\theta - 1$, докажем его конечность для размерности n_θ . Для этого воспользуемся неравенством

$$I((\hat{\xi}^T, \hat{\delta}_y + \varepsilon_y, \hat{\delta}_w + \varepsilon_w)^T) - I(\hat{\theta}) \geq \frac{I(\hat{\theta})\varepsilon_y + \varepsilon_w}{(1 - \hat{\delta}_y)}, \quad (24)$$

которое следует из цепочки неравенств

$$\begin{aligned} & \frac{\hat{\delta}_w + \varepsilon_w}{1 - \hat{\delta}_y - \varepsilon_y} - \frac{\hat{\delta}_w}{1 - \hat{\delta}_y} = \\ & \left(\frac{\hat{\delta}_w + \varepsilon_w}{1 - \hat{\delta}_y - \varepsilon_y} - \frac{\hat{\delta}_w + \varepsilon_w}{1 - \hat{\delta}_y} \right) + \left(\frac{\hat{\delta}_w + \varepsilon_w}{1 - \hat{\delta}_y} - \frac{\hat{\delta}_w}{1 - \hat{\delta}_y} \right) = \\ & \frac{(\hat{\delta}_w + \varepsilon_w)\varepsilon_y}{(1 - \hat{\delta}_y - \varepsilon_y)(1 - \hat{\delta}_y)} + \frac{\varepsilon_w}{1 - \hat{\delta}_y} \geq \\ & \frac{\hat{\delta}_w}{(1 - \hat{\delta}_y)} \frac{\varepsilon_y}{(1 - \hat{\delta}_y)} + \frac{\varepsilon_w}{1 - \hat{\delta}_y} \geq \frac{I(\hat{\theta})\varepsilon_y + \varepsilon_w}{(1 - \hat{\delta}_y)}. \end{aligned}$$

Из предположения леммы, что в описание конусов C_t при всех достаточно больших t не входят априорные ограничения (12), следует, что оценка θ_{t+1} является вершиной многогранника $C_t \cap \Omega_{t+1}$ и при обновлении конусов C_t происходит замена одного из неравенств из описания конуса новым неравенством, задающим полупространство Ω_{t+1} . Оценка θ_{t+1} получается из оценки θ_t смещением вдоль

одного из ребер e_k^t , $k = 1, \dots, n_\theta$ до пересечения с границей Ω_{t+1} . Покажем, что это смещение не может происходить вдоль ребра $e_{k_*}^t$. Предположим противное, т.е.

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \lambda e_{k_*}^t,$$

где $\lambda \geq \varepsilon$, поскольку θ_{t+1} находится на границе полупространства Ω_{t+1} , а расстояние от θ_t до Ω_{t+1} превосходит ε в силу условия обновления (23). Тогда с учетом неравенств (21) и (24) имеем

$$\begin{aligned} I(\theta_{t+1}) - I(\theta_t) &\geq \\ \frac{I(\theta_t)(\theta_{t+1} - \theta_t)_{n_\theta-1} + (\theta_{t+1} - \theta_t)_{n_\theta}}{1 - \delta_{yt}} &= \\ n_{t+1}^T \lambda e_{k_*}^T &\geq |n_{t+1}| \varepsilon \varepsilon_* \geq \varepsilon \varepsilon_* > 0. \end{aligned}$$

Полученное неравенство для приращения $I(\theta_{t+1}) - I(\theta_t)$ противоречит доказанной выше сходимости последовательности $I(\theta_t)$.

Изменение оценки θ_t вдоль ребра, отличного от $e_{k_*}^t$, означает, что неравенство с номером k_* в описании конусов C_t остается неизменным при всех достаточно больших t . Тем самым все обновления конусов происходят в подпространстве размерности $n_\theta - 1$, и их число конечно в силу индукционного предположения. Лемма доказана. $\square$

Основной результат статьи представлен в следующей теореме.

Теорема 1. Пусть объект управления удовлетворяет уравнению модели (1) и выполнены предположения **A1**, **A2** с неизвестным вектором параметров $\theta = (\xi^T, \delta_y, \delta_w)^T$. Пусть управление объектом осуществляется адаптивным регулятором

$$b^t(q^{-1})u_t = (a^t(q^{-1}) - 1)y_{t+1}, \quad (25)$$

в котором полиномы $a^t(\lambda)$ и $b^t(\lambda)$ имеют вектор коэффициентов ξ_t , вычисляемый описанным выше конусным алгоритмом с параметром мертвой зоны $0 < \varepsilon < 1 - \bar{\delta}_y$. Если в замкнутой системе управления (1), (25), (17), (18) конусные оценки C_t удовлетворяют предположениям леммы 1, то число обновлений конусных оценок C_t и векторных оценок θ_t конечно и

$$\limsup_{t \rightarrow +\infty} |y_t| \leq J(\delta_{y\infty}, \delta_{w\infty}) + C\varepsilon \leq J(\delta_y, \delta_w) + C\varepsilon, \quad (26)$$

где $\delta_{y\infty}, \delta_{w\infty}$ – компоненты установившейся оценки $\theta_\infty = (\theta_\infty^T, \delta_{y\infty}, \delta_{w\infty})^T$ и

$$C = \frac{I(\theta_\infty) + 1}{1 - \hat{\delta}_y} \varepsilon.$$

Доказательство теоремы сводится к применению леммы 1 и вычислению постоянной C на основе неравенств (22) и (24).

Замечание 1. Неравенство (26) означает решение поставленной оптимальной задачи (8) с гарантированной точностью $C\varepsilon$, в которой параметр мертвой зоны ε можно выбирать достаточно малым.

Замечание 2. Вопрос о конечной сходимости конусного алгоритма оценивания без условий “невыврожденности” конусов (21) и отсутствия априорных

ограничений в описании конусов останется открытым. Следует однако подчеркнуть, что легко проверяемое в процессе управления “ненарушение” этих условий в течение длительного отрезка времени гарантирует верхнюю границу из неравенства (26) для текущих выходов (а не для верхнего предела), т.е. дает решение задачи оптимальной стабилизации с практической точки зрения. При этом, в отличие от традиционных методов синтеза адаптивного управления [1], выполнение неравенств (10) означает онлайн верификацию модели с установившимся вектором параметров θ_t и дает согласованную с измерениями оценку качества адаптивной системы.

Литература

1. Ioannou P., Sun J. Robust adaptive control. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River. N.J., 1995.
2. Khammash M., Pearson J.B. Performance robustness of discrete-time systems with structured uncertainty // IEEE Trans. Autom. Control. 1991. Vol. 36. No. 4. P. 398–412.
3. Sokolov V.F. ℓ_1 robust performance of discrete-time systems with structured uncertainty // Syst. Control Lett. 2001. Vol. 42(5). P. 363–377.
4. Соколов В.Ф. Адаптивное робастное управление дискретным скалярным объектом в ℓ_1 -постановке // АиТ. 1998. № 3. С. 107–131.
5. Соколов В.Ф. Адаптивное минимаксное управление на основе рекуррентного линейного программирования // АиТ. 1993. № 12. С. 127–139.
6. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.

References

1. Ioannou P., Sun J. Robust adaptive control. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River. N.J., 1995.
2. Khammash M., Pearson J.B. Performance robustness of discrete-time systems with structured uncertainty // IEEE Trans. Autom. Control. 1991. Vol. 36. No. 4. P. 398–412.
3. Sokolov V.F. ℓ_1 robust performance of discrete-time systems with structured uncertainty // Syst. Control Lett. 2001. Vol. 42(5). P. 363–377.
4. Sokolov V.F. Adaptive robust control of a discrete scalar object in the ℓ_1 -statement // Autom. Remote Control. 1998. Vol. 59. N. 3. Part. 2. P. 392–411.
5. Sokolov V.F. Adaptive minimax control based on recursive linear programming // Autom. Remote Control. 1993. Vol. 54. N. 12. P. 1835–1845.
6. Fomin V.N., Fradkov A.L., and Yakubovich V.A. Adaptivnoye upravlenie dinamicheskimi ob'ektami [Adaptive control of dynamic plants]. Moscow: Nauka, 1981.

Статья поступила в редакцию 21.03.2018.

УДК 517.2,512.643
DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-13-15

О ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИИ МАТРИЧНЫХ ФУНКЦИЙ

А.В. ЖУБР

Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
avzhubr@gmail.com

Рассматриваются некоторые вопросы, связанные с дифференцированием матричных функций.

Ключевые слова: симметрическая матрица, собственные значения, матричная функция, дифференцирование

A.V. ZHUBR. ON DIFFERENTIATING MATRIX FUNCTIONS

There are several ways to extend a given numerical function to the realm of matrices. The following two questions naturally arise: (1) under what conditions a given numerical function generates differentiable matrix function; (2) how one can express the differential of a matrix function obtained in this way by using matrix operations. We give answers to these questions for a reasonable special case.

Keywords: symmetric matrix, eigenvalues, matrix function, differentiating

Введение

Матричные функции, то есть отображения $X \mapsto Y$, где X и Y – матрицы (обычно квадратные одной размерности, хотя это и не обязательно) – хорошо известный предмет, описанный во множестве учебников (см., например, [1]). Известно несколько более или менее эквивалентных процедур, позволяющих при определенных условиях построить матричную функцию $f(X)$, отвечающую заданной числовой функции $f(t)$ и являющуюся в определенном смысле ее продолжением (см. [1], главы 5–8). При этом естественным образом возникают вопросы: (1) при каких условиях на числовую функцию $f(t)$ соответствующая матричная функция $f(X)$ (рассматриваемая как вектор-функция многих переменных) оказывается дифференцируемой, и (2) каким образом можно формально представить дифференциал матричной функции $f(X)$ как результат применения обычных матричных операций к матричным функциям, порожденным числовой функцией $f(x)$ и ее производными. Некоторые частичные результаты этого рода можно найти, например, в докладе [2], в общем же случае удовлетворительных ответов, по-видимому, нет. Настоящая заметка в свою очередь не претендует на какую-либо полноту – мы приводим ряд полезных общих соображений и даем вариант ответа на оба вопроса в некотором достаточно разумном специальном случае.

1. Некоторые обозначения и факты

Действительное линейное пространство квадратных матриц порядка n обозначается через M_n , подпространство симметрических матриц – через M_n^s , подпространство антисимметрических мат-

риц – через M_n^a . Если

$$X \mapsto X^t : M_n \rightarrow M_n$$

– оператор транспонирования, то, очевидно, M_n^s и M_n^a – его собственные подпространства, отвечающие собственным значениям $+1$ и -1 . Размерности этих подпространств даются формулами

$$\dim M_n^s = (n^2 + n)/2, \dim M_n^a = (n^2 - n)/2. \quad (1)$$

Множество ортогональных матриц в M_n обозначается через O_n , а единица этой группы – через 1 (вместо обычного E). Как известно, условие $C \in O_n$ можно записать как $C^t C = 1$ или же $C^t = C^{-1}$.

Диагональная матрица с диагональными элементами $\lambda_1 \dots \lambda_n$ обозначается $\text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_n)$ или короче $\text{diag}(\lambda)$, где λ – строка $(\lambda_1 \dots \lambda_n)$.

Стандартное скалярное произведение на пространстве M_n задается формулой

$$\langle X, Y \rangle = \sum_{i,j=1..n} X_{ij} Y_{ij} = \text{tr}(X^t Y), \quad (2)$$

где tr – оператор следа. Легко проверяется, что $\langle X, Y \rangle = 0$ для $X \in M_n^s$ и $Y \in M_n^a$, так что имеется ортогональное разложение $M_n = M_n^s \oplus M_n^a$.

Через $\text{Sp } X \subset \mathbb{R}$ обозначается спектр (множество собственных чисел) матрицы $X \in M_n^s$. Иногда будет удобнее рассматривать $\text{Sp } X$ не как множество, а как занумерованный список, упорядоченный по возрастанию, в котором каждое собственное число повторяется столько раз, какова его кратность; мы будем переходить от одного варианта к другому без отдельного предупреждения. Как известно, всякая матрица $X \in M_n^s$ может быть представлена в виде

$$C^{-1} \cdot \text{diag}(\text{Sp } X) \cdot C, \quad C \in O_n. \quad (3)$$

2. Одно семейство ортогональных разложений пространства M_n^s

Для матриц $X, Y \in M_n$ через $[X, Y]$ обозначается их коммутатор $XY - YX$. Нетрудно заметить, что если матрицы X, Y обе симметрические или антисимметрические, то $[X, Y]$ – антисимметрическая матрица; если же одна из матриц симметрическая, а другая антисимметрическая, то матрица $[X, Y]$ – симметрическая. В частности, для каждой матрицы $X \in M_n^s$ мы получаем линейный оператор

$$\text{ad}_X : M_n \rightarrow M_n, \quad (4)$$

действующий по формуле $\text{ad}_X(Y) = [X, Y]$ и отображающий M_n^s в M_n^a и, наоборот, M_n^a в M_n^s . Через R_X^s и Φ_X^a (соответственно R_X^a и Φ_X^s) мы далее обозначаем ядро и образ сужения ad_X на пространство M_n^s (соответственно на M_n^a).

Пусть матрица X имеет k различных собственных чисел с кратностями $n_1, n_2, \dots, n_k$ (так что $n_1 + \dots + n_k = n$).

Лемма 1. *Имеют место равенства:*

- 1) $\dim R_X^s = (\sum n_i^2 + n)/2$,
- 2) $\dim R_X^a = (\sum n_i^2 - n)/2$,
- 3) $\dim \Phi_X^s = (n^2 - \sum n_i^2)/2$.

Доказательство. Все приведенные выше определения инвариантны относительно преобразований подобия (иначе говоря, ортогональных замен координат), поэтому примем $X = \text{diag}(\lambda)$. В этом случае $[X, Y]_{ij} = (\lambda_i - \lambda_j)Y_{ij}$, так что интересующие нас ядра (равенства 1 и 2) составлены из симметрических (соответственно антисимметрических) матриц, удовлетворяющих системе уравнений

$$(\lambda_i - \lambda_j)Y_{ij} = 0, \quad i, j = 1, \dots, n.$$

Это блочно-диагональные матрицы с блоками порядка $n_1, n_2, \dots, n_k$, соответственно симметрическими или антисимметрическими. Требуемые равенства следуют отсюда очевидным образом.

Что касается равенства 3, то это следствие первого равенства, а также хорошо известного соотношения между размерностями ядра, образа и области определения линейного оператора. $\square$

Суммируя равенства 1 и 3, получаем:

$$\dim R_X^s + \dim \Phi_X^s = \dim M_n^s. \quad (5)$$

Теорема 1. *Любая матрица $X \in M_n^s$ определяет разложение в ортогональную сумму*

$$M_n^s = R_X^s \oplus \Phi_X^s; \quad (6)$$

говоря подробнее, всякая матрица $Y \in M_n^s$ единственным образом представляется в виде $Y_1 + Y_2$, где Y_1 и Y_2 – взаимно ортогональные симметрические матрицы, при этом Y_1 перестановочна с X , а Y_2 имеет вид $[X, A]$ с $A \in M_n^a$. Это утверждение остается верным, если наложить на A дополнительное условие $A \perp R_X^a$, и в этом случае матрица A также оказывается однозначно определенной матрицей Y .

Доказательство. Ортогональность подпространств R_X^s и Φ_X^s , т.е. равенство $\text{tr}(Y^t[X, A]) = 0$ для любых $X, Y \in M_n^s$ с $XY = YX$ и любого $A \in M_n^a$, проверяется непосредственно; теперь ссылка на соотношение (5) доказывает равенство (6), и тем самым существование и единственность матриц Y_1, Y_2 . Что касается матрицы A , то она определяется равенством $[X, A] = Y_2$ с точностью до произвольного слагаемого из R_X^a ; другими словами, указанное равенство задает матрицу A как смежный класс пространства M_n^a по подпространству R_X^a . Условие же $A \perp R_X^a$ выделяет в этом смежном классе фиксированный элемент – матрицу с минимальной «фробениусовой» нормой $\|A\| = \langle A, A \rangle^{1/2}$. $\square$

Примечание 1. В дальнейшем разложение матрицы Y , о котором идет речь в теореме 1, мы будем записывать в виде

$$Y = Y_r + [X, Y_\varphi]. \quad (7)$$

Примечание 2. В случае, когда спектр $\text{Sp } X$ простой, условие $A \perp R_X^a$ теоремы 1 пусто (виду $R_X^a = 0$) и, следовательно, матрица Y_φ однозначно определяется (как и Y_r) одним лишь только равенством (7).

3. Функции симметрических матриц

Пусть $f(t)$ – функция, заданная на множестве $\{\lambda_1 \dots \lambda_n\} = \text{Sp}(X)$, $X \in M_n^s$. Определим новую матрицу $f(X) \in M_n^s$ следующим образом: если X представлена в виде (3), то полагаем

$$f(X) = C^{-1} \cdot \text{diag}(f(\lambda_1) \dots f(\lambda_n)) \cdot C. \quad (8)$$

Независимость этого определения от выбора диагонализующей матрицы вытекает из другого варианта определения (как легко убедиться, эквивалентного предыдущему), а именно

$$f(X) = \sum_{i=1..k} f(\lambda_i) P_i, \quad (9)$$

где $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ – все различные собственные числа матрицы X , а P_i – оператор ортогонального проектирования на i -е собственное подпространство (на «более координатном» языке P_i – это симметрическая матрица с условием $P_i^2 = P_i$, пространство столбцов которой совпадает с i -м собственным подпространством).

Примечание. Изложенное выше – сильно упрощенные (в силу симметричности матрицы X) версии конструкций, описанных в [1, глава 5] и множестве других источников.

Теорема 2. *Пусть X – симметрическая матрица с простым спектром, и пусть $f(t)$ – числовая функция класса C^r , определенная в некоторой окрестности множества $\text{Sp } X$. Тогда найдется окрестность U матрицы X в пространстве M_n^s , в которой матричная функция $f : U \rightarrow M_n^s$ определена и также принадлежит классу C^r .*

Доказательство. В силу предположения о простоте спектра матрицы X , характеристический многочлен $h(\lambda) = \det(\lambda - X)$ не имеет общих корней со своей производной $h'(\lambda)$, и следовательно, для всех достаточно близких к $h(\lambda)$ многочленов их корни являются C^∞ -функциями (собственно, даже аналитическими функциями) от коэффициентов многочлена (теорема о неявной функции). Тем самым для любых $X^* \in M_n^s$, достаточно близких к X , собственные числа остаются простыми и выражаются в виде функций класса C^∞ от элементов матрицы X^* . Нетрудно видеть, что то же верно и для собственных векторов, а значит и для проекторов $P_1, \dots, P_n$, соответствующих матрице X^* . Утверждение теоремы следует теперь очевидным образом из формулы (9), примененной к X^* . $\square$

Примечание. Автору не известно, верно ли утверждение теоремы 2 в случае кратных собственных чисел, хотя близкие к этому вопросы активно изучаются и имеют большую литературу ([3] и др.).

Предположим теперь, что X – снова, как и выше, симметрическая матрица с простым спектром, и что $f(t)$ – числовая непрерывно дифференцируемая функция на некоторой окрестности спектра $\text{Sp}(X)$. Как в этом случае можно вычислить дифференциал определенной выше матричной функции «в точке X »?

Мы будем использовать обозначение dX для «малого приращения» матрицы X , и $df(X)$ – для дифференциала соответствующей матричной функции:

$$f(X + dX) = f(X) + df(X) + o(dX),$$

где, как обычно, $df(X)$ зависит от dX линейно и $o(dX)/\|dX\| \rightarrow 0$ при $\|dX\| \rightarrow 0$. В последующем изложении, для экономии места, мы будем вышеприведенное равенство (и подобные ему) записывать как

$$f(X + dX) \approx f(X) + df(X).$$

Мы, конечно, всегда имеем возможность записать дифференциал $df(X)$ в виде $\sum_{ij} F^{ij} dX_{ij}$, где $F^{ij} = F^{ji}$ – некоторые матрицы (той же размерности, что и матрица X), являющиеся обычными частными производными вектор-функции $f(X)$ по переменным X_{ij} . Представление матричного дифференциала в таком виде является, однако, «неестественным» с точки зрения матричной алгебры, так что возникает вопрос о существовании какой-либо более естественной формы. Некоторый вариант ответа на этот вопрос мы получим, воспользовавшись полученным выше разложением (7). Именно, запишем dX в виде

$$d_r X + [X, d_\varphi X]. \quad (10)$$

Мы будем называть матрицы $d_r X$ и $d_\varphi X$ соответственно *радиальной* и *угловой* частью «приращения» dX (некоторая мотивировка для такой терминологии будет видна из следующего далее доказательства теоремы).

Теорема 3. Для любой симметрической матрицы X с простым спектром и любой C^1 -функции $f(t)$ в

окрестности множества $\text{Sp}(X)$ имеет место соотношение

$$df(X) = f'(X) \cdot d_r X + [f(X), d_\varphi X], \quad (11)$$

где $f'(t)$ – обычная производная функции $f(t)$.

Доказательство. Утверждение не зависит от выбора системы координат, поэтому мы можем считать, что матрицы X и dX одновременно диагональны: $X = \text{diag}(\lambda)$ и $dX = \text{diag}(d\lambda)$. Используя выражение (10) для dX , мы напомним

$$X + dX = X + d_r X + X \cdot d_\varphi X - d_\varphi X \cdot X, \quad (12)$$

что, в свою очередь, представим (пренебрегая «бесконечно малыми высшего порядка») как

$$X + dX \approx (1 - d_\varphi X)(X + d_r X)(1 + d_\varphi X) \quad (13)$$

и, наконец, как

$$X + dX \approx C^{-1} \text{diag}(\lambda + d\lambda) C, \quad (14)$$

где C – ортогональная матрица $e^{d_\varphi X}$. В соответствии с определением (8) мы теперь можем написать

$$f(X + dX) \approx C^{-1} \text{diag}(f(\lambda) + f'(\lambda)d\lambda) C. \quad (15)$$

Повторяя в обратном направлении тот же путь, по которому мы перешли от равенства (12) к равенству (14), мы и получаем соотношение (11). $\square$

Примечание. В приведенном выше рассуждении имеется один «тонкий момент» – переход от соотношения (14) к соотношению (15), для чего и требуется теорема 2, позволяющая утверждать, что разность между левой и правой частями соотношения (15) имеет такой же (во всяком случае не больший) порядок малости, чем аналогичная разность для соотношения (14).

Автор благодарит А.Н. Тихомирову, привлечшего его внимание к этому кругу вопросов.

Литература

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Физматлит, 2004. 560 с.
2. Olsen P.A., Rennie S.J., Goel V. Efficient Automatic Differentiation of Matrix Functions. IBM T.J. Watson Research Center, July 25, 2012.
3. Chu K.-W.E. On Multiple Eigenvalues of Matrices Depending on Several Parameters // SIAM J. Numer. Anal. 1990. Vol. 27(5). P.1368-1385.

References

1. Gantmacher F.R. Teoriya matric [The Theory of Matrices]. AMS Chelsea Publishing: Reprinted by Amer. Math. Soc., 2000. 660 p.
2. Olsen P.A., Rennie S.J., Goel V. Efficient Automatic Differentiation of Matrix Functions. IBM T.J. Watson Research Center, July 25, 2012.
3. Chu K.-W.E. On Multiple Eigenvalues of Matrices Depending on Several Parameters // SIAM J. Numer. Anal. 1990. Vol. 27(5). P.1368-1385.

Статья поступила в редакцию 16.04.2018.

УДК 519.2

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-16-18

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ НА ИДЕАЛЬНОМ КРИСТАЛЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Д.В. СИВКОВ^{*,**}, В.И. ПУНЕГОВ^{*}^{*}Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар^{**}Балтийский федеральный университет им. И.Канта, г. Калининград
danjorno@yandex.ru, vpunegov@dm.komisc.ru

Предложено решение обратной задачи рассеяния рентгеновского излучения с поперечно-ограниченным волновым фронтом в идеальном кристалле в рамках динамической теории дифракции рентгеновских лучей с учетом влияния инструментальной функции дифрактометра. Для расчета использовался генетический алгоритм в виде метода дифференциальной эволюции.

Ключевые слова: рентгеновская дифракция, метод дифференциальной эволюции

D.V. SIVKOV, V.I. PUNEGOV. SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM OF X-RAY DIFFRACTION ON AN IDEAL CRYSTAL USING THE DIFFERENTIAL EVOLUTION METHOD.

For solving the inverse problem of scattering of X-ray with transversely restricted wavefront in an ideal crystal within the dynamical theory of X-ray diffraction taking into account the effect of the diffractometer's instrumental function the Genetic Algorithm in the form of Differential Evolution method was used. Residual functionals of four types are considered. The simulation of the X-ray scattering experiment in an ideal crystal is carried out. Dependences of the corresponding values of the residual functionals on the number of cycles of the Differential Evolution algorithm are obtained. For the indicated case, the best solution (the form of the residual functional) is determined. The proposed approach seems useful and effective for nondestructive diagnostics of nanostructured media.

Keywords: X-ray diffraction, Differential Evolution method

Введение

На сегодняшний день актуальными задачами являются повышение контроля качества и совершенствование производства элементов нанoeлектронных устройств. Наиболее эффективным методом анализа структуры этих объектов является рентгеновская дифракция (РД). Для решения обратной задачи помимо разработки теории, описывающей взаимодействие рентгеновского излучения (РИ) с веществом, необходим эффективный алгоритм минимизации функционала невязки. Особенностью этой задачи является множество локальных минимумов в пространстве параметров большой размерности. Поэтому традиционные итеративные методы оптимизации не очень хорошо подходят из-за значительного времени, необходимого для поиска решения. Эволюционные алгоритмы, и в том числе генетические [1], показали свою высокую эффективность для поиска решений в пространстве большого числа параметров в широком диапазоне, в том числе в задачах рассеяния РИ [2, 3].

1. Теория дифракции

В эксперименте по РД полная интенсивность, получаемая на выходе детектора, записывается как

$$I_{sim}(q_x, q_z) = K \cdot \bar{I}_h(q_x, q_z) + I_{bg}, \quad (1)$$

где I_{bg} – интенсивность фона, K – масштабный коэффициент. Выражение для интенсивности рассеяния на входе детектора имеет вид [1]

$$\bar{I}_h(\mathbf{q}) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} d\mathbf{q}' R^M(\mathbf{q}') R^A(\mathbf{q}') I_h(\mathbf{q} - \mathbf{q}')}{\int_{-\infty}^{+\infty} d\mathbf{q}' R^M(\mathbf{q}') R^A(\mathbf{q}')},$$

где R^M , R^A – коэффициенты отражения монохроматора и анализатора, I_h – интенсивность рассеянного пучка, вектор $\mathbf{q} = (q_x, q_z)$.

$\bar{I}_h$ можно представить в виде двух слагаемых, связанных через фактор Дебая-Валлера f

$$I_h(\mathbf{q}) = (1 - f^2) I_h^d(\mathbf{q}) + f^2 I_h^c(\mathbf{q}),$$

I_h^c – когерентная часть интенсивности, описывающая рассеяние на идеальном кристалле (содержит информацию о толщинах и периодах слоев в кристаллической структуре); I_h^d – диффузная часть (содержит данные о параметрах структурных дефектов).

Расчет интенсивности рассеяния проводился в рамках динамической теории РД, расширенной на частный случай поперечно ограниченных волновых фронтов падающей и отраженной волн с учетом влияния инструментальной функции дифрактометра [4]. В этом случае интенсивность дифрагированной волны (в геометрии Брэгга) вблизи узла обратной решетки $\mathbf{h}$ зависит от ширины засветки поверхности кристалла $l_x^{(in)}$ и толщины кристалла l_z как

$$I_h^c(\mathbf{q}) = \left| a_h \frac{\exp(i\bar{\xi}l_z) - 1}{\bar{Q}} \text{sinc}\left(\frac{q_x l_x^{(in)}}{2}\right) \right|^2,$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\xi} &= \sqrt{\bar{\psi}^2 - 4a_h a_{\bar{h}}}, & \bar{Q} &= \xi_1 e^{i\bar{\xi}l_z} - \xi_2, \\ \bar{\psi} &= 2a_0 - q_x \cot \theta_B - q_z, & \xi_{1,2} &= (-\bar{\psi} \pm \bar{\xi})/2, \\ a_0 &= \frac{\pi \chi_0}{\lambda \sin \theta_B}, & a_h &= \frac{C \pi \chi_h}{\lambda \sin \theta_B}. \end{aligned}$$

Здесь λ – длина волны РИ, $\chi_{0,h}$ – Фурье компоненты рентгеновской поляризуемости, C – коэффициент поляризации.

Для моделирования эксперимента в выражение (1) в качестве множителя добавлена функция шума Пуассона в виде [3]

$$n(\mathbf{q}) = \sqrt{\frac{I_R(\mathbf{q})}{6I_{bg}}} \text{rand}[(-1, 1)], \quad (2)$$

где $\text{rand}[(-1, 1)]$ – случайная величина, получаемая генератором псевдослучайных чисел в диапазоне $[-1, 1]$.

2. Функционал невязки

Рассмотрим функционалы невязки вида

$$\begin{aligned} \rho_{abs} &= \frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} |I_{sim}(\mathbf{q}^i; \mathbf{x}) - I_{exp}(\mathbf{q}^i)|, \\ \rho_{sqr} &= \frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} \frac{[I_{sim}(\mathbf{q}^i; \mathbf{x}) - I_{exp}(\mathbf{q}^i)]^2}{I_{sim}(\mathbf{q}^i; \mathbf{x})}, \\ \rho_{abs}^{log} &= \frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} |\log I_{sim}(\mathbf{q}^i; \mathbf{x}) - \log I_{exp}(\mathbf{q}^i)|, \\ \rho_{sqr}^{log} &= \frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} [\log I_{sim}(\mathbf{q}^i; \mathbf{x}) - \log I_{exp}(\mathbf{q}^i)]^2, \end{aligned}$$

где $\mathbf{x}$ – вектор параметров в пространстве параметров, I_{sim} – теоретические значения дифракционной интенсивности, I_{exp} – экспериментальные значения.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных по абсолютной величине (ρ_{abs}) эффективно для анализа при больших интенсивностях, а

также для малоуглового рассеяния в недеформированных кристаллах. То есть, в тех случаях, когда данные на кривой имеют один и тот же порядок.

Использование среднеквадратичного отклонения (ρ_{sqr}) должно быть эффективным в случаях, аналогичных (ρ_{abs}). Кроме того, при его использовании точность решения слабо зависит от статистического шума, и такой подход применим для анализа сильно зашумленных сигналов.

Сравнение логарифмов (ρ_{abs}^{log}) эффективно для анализа данных при малых значениях интенсивности или когда пики исследуемой кривой различаются на порядок или несколько порядков. Это справедливо для больших углов рассеяния, когда интенсивность рассеяния содержит данные о структурных особенностях порядка длины падающей волны, а в спектре есть пики более высоких порядков. Оно также может быть использовано для малоуглового рассеяния, но при рассмотрении диффузного канала, содержащего информацию о малых деформациях.

Кроме того, по аналогии с (ρ_{sqr}) был добавлен функционал невязки в виде среднеквадратичного отклонения логарифмов (ρ_{sqr}^{log}).

3. Метод дифференциальной эволюции

Алгоритм метода дифференциальной эволюции (DE) подробно описан в работе [5]. Для расчета применялась DE-стратегия вида «rand/1/exp» (Вектор популяции для мутации выбирался случайным образом, использовался один разностный вектор, и пробный вектор генерировался с применением экспоненциального скрещивания). В задаче для векторов-мутантов использовались абсолютные значения соответствующего выражения, чтобы исключить поиск решения среди векторов с отрицательными параметрами.

4. Результаты

В работе проведено моделирование эксперимента по рассеянию РИ на идеальном кристалле Si толщиной $100 \mu m$ вблизи узла (111). Ширина щели перед образцом (поперечная ширина волны) $w = l_x^{(in)} \sin \theta_B = 100 \mu m$, величина интенсивности фона $I_{bg} = 1$, масштабный коэффициент интенсивности $K = 10^6$. Длина волны падающего пучка $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$. Статистический шум был добавлен согласно формуле (2). Расчеты проводили с использованием языка программирования C++. В основе программы лежал шаблон алгоритма, взятый с интернет страницы алгоритма <http://www1.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>.

Таблица 1

Структурные параметры, их диапазоны и параметры алгоритма DE, используемые для поиска

Table 1

Structure parameters, their search ranges and DE algorithm parameters, using for search

Параметры	Диапазоны	Параметры DE
$l_z = 100 \mu m$	$(10 - 200) \mu m$	$F = 0.1$
$w = 100 \mu m$	$(10 - 200) \mu m$	$C = 0.4$
$I_{bg} = 1$	$(0 - 10)$	$x_0 = random$

Структурные параметры, применяемые для моделирования, диапазоны поиска и параметры алгоритма DE, используемые для решения обратной задачи, представлены в табл. 1. Параметры алгоритма F и C были выбраны, как соответствующие наименьшей величине функции подгонки (функционала невязки) для задачи дифракции [3]. Выражение « $x_0 = random$ » (табл. 1) означает, что целевой вектор выбирался из популяции случайным образом.

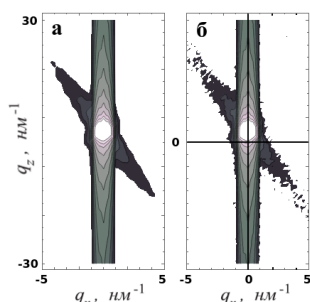


Рис. 1. Карта распределения интенсивности рассеяния РИ в обратном пространстве: (а) – результат решения обратной задачи; (б) – моделирование эксперимента. Линиями указаны сечения вдоль $q_x = 0$ и $q_z = 0$, данные которых использовались для минимизации функционала невязки.

Fig 1. RSM data. Left – experimet, right – model.

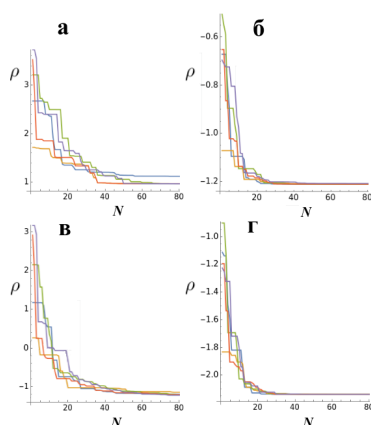


Рис. 2. Зависимости функционала невязки от числа циклов алгоритма DE в логарифмическом масштабе взятого по абсолютной (а), среднеквадратичной (б), абсолютной логарифмической (в), среднеквадратичной логарифмической (г) величинам. Кривые одного цвета имеют одинаковое зерно для генерации псевдослучайных чисел.

Fig. 2 Dependences of differen residual functionals on the number of algorithm cycles in log scale. Curves of the same color hase the same pseudo-random number generator ceed.

Результаты решения обратной задачи РД в рамках предлагаемого подхода показаны на рис. 1. На рис. 2 представлены зависимости соответствующих значений функционалов невязки от числа циклов алгоритма DE. Для кривых, имеющих один цвет, выбрано одинаковое зерно для генератора псевдослучайных чисел. В табл. 2 приведены средние значения относительных отклонений от неизвестных структурных параметров, указанных в численном эксперименте.

Из рис. 2 видно, что наилучшее решение

(наиболее точное) было найдено для функционала невязки (рис. 2, б), заданного выражением ρ_{sqr} . С остаточным функционалом в виде ρ_{abs} был получен менее точный результат (рис. 2, а). Следует отметить, что использование остаточного функционала в виде ρ_{sqr}^{log} позволяет быстрее получить решение, но с наихудшей точностью. Это позволяет применять его для начального сужения диапазона параметров и последующего поиска с использованием решения ρ_{abs} . То же самое относится и к решению ρ_{abs}^{log} , которое не сильно уступает по скорости ρ_{sqr}^{log} .

Таблица 2

Средние значения относительных отклонений параметров

Table 2

The average values of the relative deviations parameters

	ρ_{abs}	ρ_{sqr}	ρ_{abs}^{log}	ρ_{sqr}^{log}
$\frac{\Delta l_z}{l_z}$	0.1	0.01	0.7	0.08
$\frac{\Delta w}{w}$	0.3	0.06	0.16	0.1
$\frac{\Delta I_{bg}}{I_{bg}}$	1.6e-4	2.6e-4	9.2e-4	20.0e-4
$\frac{\Delta K}{K}$	3.1e-2	3.0e-2	1.6e-2	5.3e-2

Закключение

Разработана методика решения обратной задачи для анализа карт распределения интенсивности РИ в обратном пространстве. Предлагаемый подход с использованием алгоритма DE представляется полезным и эффективным для неразрушающей диагностики наноструктурированных сред.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект No 18-10-2-23), РФФИ (проект No 17-02-00090), РФФИ и министерства образования РК (16-43-110350 p_a), Программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И.Канта.

Литература

1. Mitchell M. An introduction to genetic algorithms. London: MIT Press. 1996. 158 p.
2. Wormington M., Pannaccione C., Matney K.M., Bowen D.K. Characterization of structures from X-ray scattering data using genetic algorithms // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 1999. Vol. 357. P. 2827 – 2848.
3. Hannon A.F., Sunday D.F., Windover D., Kline J. Advancing x-ray scattering metrology using inverse genetic algorithms // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2016. Vol. 15. Issue 3. P. 034001.
4. Punegov V.I., Pavlov K.M., Karpov A.V., Faleev N.N. Applications of dynamical theory of X-ray diffraction by perfect crystals to reciprocal space mapping // J. Appl. Cryst. 2017. Vol. 50. P. 1256 – 1266.
5. Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces // J. Global Optim. 1997. Vol. 11 P. 341 – 359.

Статья поступила в редакцию 01.06.2018.

УДК 538.9

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-19-22

НEXAFS И XPS ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

С.В. НЕКИПЕЛОВ***, А.А. ЛОМОВ***, А.Е. МИНГАЛЕВА***, О.В. ПЕТРОВА***, Д.В. СИВКОВ*****, Н.Н. ШОМЫСОВ*, Е.Н. ШУСТОВА**, В.Н. СИВКОВ*

*Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

**Сыктывкарский госуниверситет им. П. Сорокина, г. Сыктывкар

***Физико-технологический институт РАН, г. Москва

****Балтийский федеральный университет им. И.Канта, г. Калининград

NekipelovSV@mail.ru

Методами ультрамягкой рентгеновской спектроскопии с применением синхротронного излучения исследованы пористые слои кремния с различными типами проводимости. Определена эффективная толщина оксида на поверхности кремниевого скелетона и изучена структура интерфейса на границе кремний/оксид кремния. Показано, что тонкая структура спектров поглощения Si 2p кремниевого скелета совпадает с тонкой структурой спектра кристаллического кремния, а толщина оксидного слоя на поверхности пористого кремния 1,8-2,4 нм для различных образцов. Параметр x в стехиометрической формуле SiO_x оксида кремния находится в диапазоне 1,66–1,82.

Ключевые слова: пористый кремний, оксидный слой, NEXAFS-спектроскопия, XPS-спектроскопия

S.V. NEKIPELOV, A.A. LOMOV, A.E. MINGALEVA, O.V. PETROVA, D.V. SIVKOV, N.N. SHOMYSOV, E.N. SHUSTOVA, V.N. SIVKOV. NEXAFS AND XPS STUDIES OF POROUS SILICON

By ultra-soft x-ray spectroscopy methods with the use of synchrotron radiation, porous layers of silicon with various types of conductivity were investigated. The effective thickness of the oxide on the surface of a silicon skeleton was determined and the interface structure at the silicon/silicon oxides interface was studied. It was shown that the fine structure of the Si 2p absorption spectra of the silicon skeleton is identical to that of the spectrum of crystalline silicon, and the thickness of the oxide layer on the surface of porous silicon is 1.8-2.4 nm for various samples. The parameter x in the stoichiometric formula SiO_x of silicon oxide is in the range of 1,66–1,82.

Keywords: porous silicon, oxide layer, NEXAFS spectroscopy, XPS spectroscopy

Введение

Пористый кремний (ПК) и другие пористые полупроводниковые материалы представляют большой фундаментальный и прикладной интерес в связи с проявлением в них как квантоворазмерного эффекта, так и простотой управления параметрами пор и пористого скелета [1]. Несмотря на активное изучение условий синтеза и модификации ПК, к настоящему времени имеется достаточно много открытых вопросов как в процессах формирования ПК, так и его диагностики. В частности, является актуальным изучение воздействия йода на процесс анодирования и на характеристики ПК, а также получение детальной информации о физике и химии поверхности ПК. В настоящей работе проводятся спектральные исследования с применением синхротронного излучения (СИ) слоев ПК, сформированных на стандартных подложках кремния, леги-

рованных сурьмой (Si(111)(Sb) КЭС, n-тип, 0.01 Ом·см) и бором (Si(111)(B) КДБ, p-типа, 0.005 Ом·см) методом анодирования в стандартном электролите без и с добавлением 5%-ного раствора йода. При этом большое внимание уделяется изучению рентгеновских фотоэлектронных спектров (x-ray photoelectron spectra, XPS) и ближней тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (near edge fine x-ray absorption structure, NEXAFS) в области Si 2p – порога ионизации. Методы ультрамягкой рентгеновской спектроскопии с применением СИ информативны для изучения приповерхностного слоя пористого кремния, поскольку дают возможность исследовать изменения состава приповерхностных слоев с глубиной в наноразмерной шкале, получать информацию о ближайшем окружении поглотившего рентгеновский квант атома и тестировать изменение атомного и химического состава поверхности ПК без ее разрушения и моди-

фикации [2, 3]. В настоящей работе NEXAFS-исследования совместно с XPS – измерениями применяются для определения эффективной толщины оксида на поверхности кремниевого скелетона и изучения структуры интерфейса на границе ПК/оксид кремния.

Результаты и обсуждение

Исследования проводились на российско-германском канале источника синхротронного излучения BESSY-II (г. Берлин). Все спектры были получены методом полного электронного выхода (Total electron yield, TEY).

Полученные в настоящей работе NEXAFS Si2p-спектры приведены на рис. 1, из которых видно явное сходство тонкой структуры изученных образцов ПК. NEXAFS Si 2p-спектров поглощения ПК может быть разделена на две области 99–103 эВ и 103–110 эВ и состоит из дублетных полос поглощения (a_1a_2), (b_1b_2), (c_1c_2), (d_1d_2) и $e_{1,2}$ с расщеплением 0.55–0.63 эВ, близким к разности (0.61 эВ) энергий связей Si 2p_{3/2}- и Si2p_{1/2}-атомных уровней.

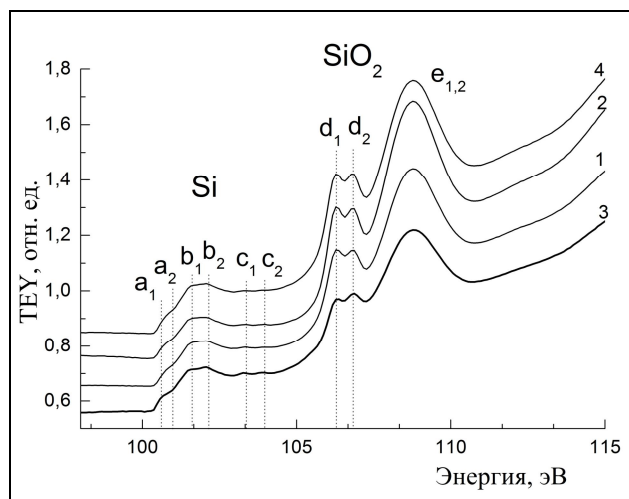


Рис. 1. NEXAFS Si2p-спектры образцов ПК: КДБ (1,2), КЭС (3,4), приготовленные травлением в электролите без (1,3) и с добавлением йода (2,4).
Fig. 1. NEXAFS Si2p spectra of PC samples: SHB (1,2), SES (3,4), etching in the electrolyte without (1,3) and with the addition of iodine (2,4).

По форме спектров и энергетическим положениям элементов тонкой структуры первая область NEXAFS Si2p – спектров может быть определена идентифицирована как структура, связанная с кристаллическим кремнием (полосы a – c), а вторая – с кристаллическим SiO₂ (полосы d – e), что позволяет утверждать, что на поверхности ПК под длительным воздействием атмосферного кислорода формируется слой хорошо координированного SiO₂.

Наличие четкой структуры металлического кремния, обусловленной сигналом TEY от рентгеновских фотоэлектронов (~90 эВ), вышедших из-под слоя оксида, дает возможность оценить толщину этого слоя d_{eff} близкой к их длине свободного пробега, т.е. порядка 1 нм. Более точные значения

оксидного слоя на поверхности кремниевого скелета измерялись методом XPS.

XPS – исследования ПК проводились с целью выяснения наличия йода в кремниевом скелетоне и оценки толщины оксидного слоя на его поверхности. В первом случае для получения обзорных спектров использовалось синхротронное излучение с энергией 1000 эВ, во втором случае измерения проводились для энергий квантов 250, 400, 650 и 1000 эВ. Обзорные XPS всех изученных образцов независимо от типа проводимости и наличия в растворителе йода определяются одинаковым набором характерных пиков и отсутствием структуры, связанной с атомами йода.

На рис.2 представлены Si 2p-спектры образца ПК для разных энергий квантов $h\nu$, нормированные по интенсивности на пик SiO₂ (I_2). Положение основных пиков соответствует энергиям связи 2p-электронов атомов кремния в чистых Si ($E_1 = 99,8$ эВ) и SiO₂ ($E_2 = 103,3$ эВ). Это указывает на то, что на поверхности ПК находится слой SiO₂ и его толщина сравнима с длинами свободного пробега λ_2

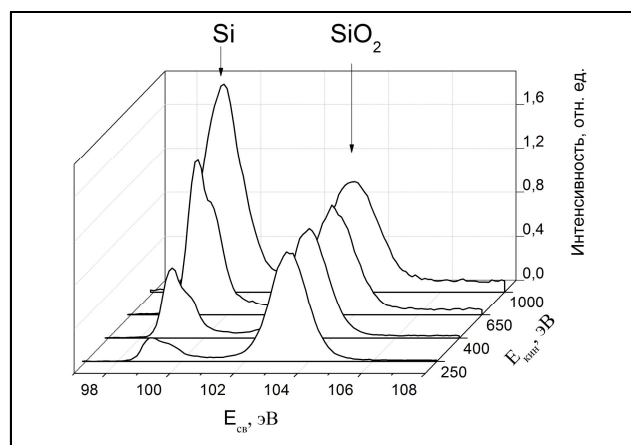


Рис.2. XPS Si 2p-спектры образца КЭС (4) для различных энергий падающих рентгеновских квантов. Спектры нормированы на интенсивность пика оксида кремния. Стрелками соответственно обозначены положения энергии связи в Si и SiO₂.
Fig.2. XPS Si2p-spectra of samples SES (4) for various energies of incident X-ray. The spectra are normalized to the intensity of the silicon oxide peak. The arrows indicate the positions of the binding energy in Si and SiO₂, respectively.

электронов в SiO₂ с кинетическими энергиями, равными разности $h\nu$ и E_1 . Эти λ_2 равны 0.88, 1.27, 1.9 и 2.72 нм [4] для энергий квантов 250, 400, 650 и 1000 эВ, соответственно.

Для идентификации вклада слоев Si и SiO₂ в структуру XPS-спектров нами проведено разложение спектра на отдельные пики с учетом вклада в интенсивность от других линий, которые в нашем случае представлялись как фон (back-ground). В простейшей модели можно рассматривать двухслойную структуру SiO₂/Si, в которой нам удалось достаточно хорошо аппроксимировать гауссовскими пиками полосы от кремния (99,3 эВ) и оксида кремния (103,4 эВ). Однако область между основ-

ными пиками от 100 – 103 эВ в рамках данного приближения описывалась неудовлетворительно.

Для улучшения аппроксимации была рассмотрена 5-слойная структура, содержащая, кроме основных слоев оксида кремния SiO_2 (Si^{4+}) и чистого кремния Si (Si^0), еще и переходные слои SiO_x , в которых атом кремния находился в состояниях Si^{3+} , Si^{2+} и Si^{1+} . Результаты данного разложения для энергии падающих квантов 250 эВ представлены на рис.3.

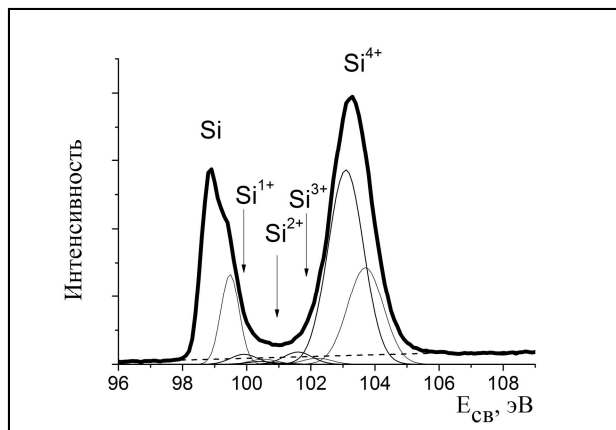


Рис.3. XPS Si2p-спектры пористого кремния для образца КЭС (4) при энергии падающего рентгеновского кванта 650 эВ.

Fig.3. XPS spectra of porous silicon for an SES sample (4) at an incident x-ray quantum energy of 650 eV.

В процессе разложения спектра для вычленения фона использовалась Shirley-аппроксимация, а спектральные пики аппроксимировались гауссовскими кривыми. Для уменьшения параметров варьирования принималось статистическое отношение интегральных интенсивностей пиков $\text{Si}_{3/2}/\text{Si}_{1/2} = 2$ и спин-орбитальное расщепление между ними бралось 0,61 эВ [5]. В табл. 1 приведены результаты обработки спектров при энергиях падающих квантов 250 и 650 эВ, где указаны положения (в эВ) и интегральная интенсивность $\text{Si}_{3/2}$ -компоненты.

Таблица 1
Результаты разложения XPS-спектров образца КЭС (4) при различных энергиях падающих $h\nu$ квантов

Results of the XPS spectra decomposition for the SES sample (4) at various incident $h\nu$ quanta energies

Table 1

Пик	$h\nu=250$ эВ		$h\nu=650$ эВ	
	Есв	I	Есв	I
Si^{4+}	103,13	1,000	103,09	1,000
Si^{3+}	101,78	0,037	101,60	0,313
Si^{2+}	100,45	0,007	100,45	0,057
Si^{1+}	99,90	0,010	99,92	0,084
Si^0	98,91	0,063	98,87	0,538

Энергетические положения для Si^{3+} , Si^{2+} и Si^{1+} -пиков хорошо коррелируют с результатами, полученными в работе [5].

Интенсивности линий I_i в XPS спектрах, описывающих эмиссию электронов с i -уровня, имеют сложную зависимость:

$$I_i = n_i \sigma_i J \lambda S \left(1 - e^{-\frac{d}{\lambda \cos \theta}} \right), \quad (1)$$

где n_i – концентрация атомов, ассоциирующихся с i -линией в спектре, σ_i – сечение, испуская фотоэлектрон из данной подоболочки атома, зависящее от энергии падающего рентгеновского кванта $h\nu$, J – интенсивность падающего излучения, θ – угол вылета фотоэлектронов, отсчитываемый от нормали к образцу, λ – длина свободного пробега электрона в исследуемом образце, S – чувствительность установки. Следует отметить, что λ определяется энергией E_{kin} вылетевшего фотоэлектрона, а S зависит от энергии падающего кванта $h\nu$, конкретных условий съемки и работы анализатора.

Если же мы имеем двухслойную структуру, когда образец сорта В покрыт тонким слоем другого вещества (сорта А), то интенсивность линий в XPS образца В будет иметь вид:

$$I_B = n_B \sigma_B J \lambda_B S_B \left(1 - e^{-\frac{d_B}{\lambda_B \cos \theta}} \right) e^{-\frac{d_A}{\lambda_A \cos \theta}}. \quad (2)$$

Вторая экспонента в формуле (2) связана с поглощением фотоэлектронов из образца В в покрывающем слое образца А.

В случае многослойной структуры получается система уравнений:

$$I_{Si^k} = n_k \sigma_k J_k \lambda_k S_k \left(1 - e^{-\frac{d_k}{\lambda_k \cos \theta}} \right) \prod_{i=k-1}^4 e^{-\frac{d_i}{\lambda_i \cos \theta}}, \quad (3)$$

где $k=0...4$ соответствует пикам от Si до Si^{4+} .

Зная параметры спектров и решая систему (3), можно найти толщины слоев Si^{4+} , Si^{3+} , Si^{2+} и Si^{1+} на поверхности чистого пористого кремния. Параметры и результаты расчетов представлены в табл. 2 и рис. 3. При моделировании длина свободного пробега в слоях Si^{3+} , Si^{2+} и Si^{1+} бралась в виде линейной аппроксимации данных для слоев Si^{4+} и Si^0 [4], а величины J_k и S_k в формулах (3) – константами при фиксированной энергии падающего рентгеновского кванта для пиков в рамках одного спектра. Как видно из табл. 2, вне зависимости от энергии падающего кванта результаты моделирования дают примерно одинаковые результаты для толщины d

Таблица 2
Результаты моделирования оксидных слоев на поверхности образца КЭС (4)

The modeling results of oxide layers on the surface of the SES sample (4)

	$h\nu=250$ эВ				$h\nu=650$ эВ			
	n [5]	λ (nm)	σ [5]	d(nm)	n [5]	λ (nm)	σ [5]	d(nm)
Si^0	1	0,656 [4]	1		1	1,561 [4]	1	
Si^{1+}	0,86	0,711	1,06	0,08	0,86	1,645	1,025	0,12
Si^{2+}	0,73	0,766	1,12	0,05	0,73	1,729	1,05	0,04
Si^{3+}	0,59	0,820	1,18	0,27	0,59	1,813	1,075	0,20
Si^{4+}	0,46	0,875 [4]	1,25	2,10	0,46	1,897 [4]	1,1	2,32

Таблица 3
Толщины оксидных слоев (в нм)
и стехиометрические формулы
для исследуемых образцов

Table 3
Thicknesses of oxide layers (in nm)
and stoichiometric formulas
for the investigated samples

Образец	1	2	3	4
Тип	КДБ	КДБ + J	КЭС	КЭС + J
Si ¹⁺	0,16	0,12	0,10	0,08
Si ²⁺	0,13	0,10	0,05	0,05
Si ³⁺	0,18	0,25	0,16	0,27
Si ⁴⁺	1,54	1,78	1,53	2,10
x (SiO _x)	1.66	1.73	1.77	1.82

слоя оксида кремния SiO₂ на поверхности образца ($\approx 2,2$ нм) и переходных слоев SiO_x. При этом, зная толщину слоев SiO_x (x=1-4), можно найти стехиометрическую формулу оксидного слоя. Она оказалась SiO_{1,82}. Альтернативным методом для нахождения аналогичной формулы является сравнение интегральной интенсивности пиков в Si2p-спектрах и интенсивностей SiO_x – пиков с соответствующими весовыми коэффициентами. В этом подходе стехиометрическая формула оксидного слоя оказалась SiO_{1,84}. Аналогичные результаты (табл. 3) были получены и для других образцов пористого кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ и Республики Коми №16-42-110610 p-a, 16-43-110350 p-a, Программы фундаментальных исследований УрО РАН 18-10-2-23 и Программы повышения конкурентноспособности Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Литература

1. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol.57. №10. P. 1046–1048.
2. Stohr J. NEXAFS spectroscopy. Berlin. Springer, 1992. 403 p.
3. X-Ray and Synchrotron Studies of Porous Silicon / V.N.Sivkov, A.A.Lomov, A.L.Vasil'ev, S.V.Nekipelov and O.V.Petrova // Semiconductors. 2013. Vol. 47, № 8. P. 1051–1057.
4. NIST Electron Inelastic-Mean-Free-Path Database (<http://www.nist.gov/srd/nist71.cfm> 3)
5. Full field chemical imaging of buried native sub-oxide layers on doped silicon patterns / F. de la Peca, N. Barrett, L.F. Zagonel, M. Walls, O. Renault // Surface Science. 2010. Vol. 604. P.1628–1636.

Статья поступила в редакцию 31.05.2018.

УДК 582.29:581.1(1-924.82)(470.1)
DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-23-33

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ ЛИШАЙНИКА *LOBARIA PULMONARIA* (L.) HOFFM. В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ

Т.К. ГОЛОВКО, И.В. ДАЛЬКЭ, О.В. ДЫМОВА, Р.В. МАЛЫШЕВ, С.Н. ПЛЮСНИНА, Т.Н. ПЫСТИНА, Н.А. СЕМЕНОВА, Г.Н. ТАБАЛЕНКОВА, М.А. ШЕЛЯКИН

*Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
golovko@ib.komisc.ru, shelyakin@ib.komisc.ru*

Изучены показатели жизнедеятельности крупнолистоватого эпифитного лишайника *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. в условиях таежной зоны на европейском Северо-Востоке России. Выявлены сезонные изменения липидного и пигментного комплексов, температуры замерзания воды в талломах. В полевых и лабораторных условиях исследована зависимость CO_2 -газообмена от оводненности и освещенности талломов. Показано, что успешная адаптация *L. pulmonaria* к условиям обитания и сезонным изменениям основных факторов среды в значительной степени обусловлена функциональными свойствами лишайника. Благодаря этому *L. pulmonaria* довольно широко распространена в таежной зоне Республики Коми, а в старовозрастных осинниках является обычным эпифитным видом. Полученные результаты следует учитывать при разработке мероприятий по охране и мониторингу, прогнозированию состояния популяций лишайника при глобальных климатических изменениях.

Ключевые слова: *Lobaria pulmonaria*, лишайник, экологическая физиология, CO_2 -газообмен, среда, таежная зона, европейский Северо-Восток

T.K. GOLOVKO, I.V. DAL'KE, O.V. DYMOVA, R.V. MALYSHEV, S.N. PLYUSNINA, T.N. PYSTINA, N.A. SEMENOVA, G.N. TABALENKOVA, M.A. SHELYAKIN. **FUNCTIONAL ECOLOGY OF LICHEN *LOBARIA PULMONARIA* (L.) HOFFM. IN THE TAIGA ZONE IN THE EUROPIAN NORTH-EAST OF RUSSIA**

The actual information on the functional ecology of the epiphytic large-leaf lichen *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., a species protected on the territory of Russia and the Republic of Komi, was obtained. Seasonal changes in the lipid and pigment complexes, as well as temperature of water freezing in thalluses were established for the first time. It was shown that the green pigments fund decreases during winter, and reaches the minimum values in spring due to the oxidative destruction of chlorophylls. The fund of carotenoids is more stable. The ratio of unsaturated and saturated fatty acids increases in winter as compared to summer period. The temperature of the water-ice phase transition in winter is reduced by an average of 2.5°C and is about -11°C . The dependence of the lichen CO_2 -gas exchange on water content and lighting was studied in the field and laboratory conditions. It was found that hydrated thalluses at optimal light-temperature conditions assimilate CO_2 at a rate of $3-6\ \mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$. In natural habitats, the intensity of CO_2 net absorption in thalluses is highly variable and depends on the degree of dehydration. In the warm and dry period of vegetation, positive gas exchange was registered only in the early morning hours, when the thalluses were saturated with vapors of atmospheric moisture. In general, we can conclude that the lichen symbiosis is a fairly stable superorganismic photosynthesizing system. Successful adaptation of *L. pulmonaria* to habitat conditions and seasonal changes of the main environmental factors is largely due to the functional properties of the lichen. Thanks to this, the lichen is widespread in the taiga forests of various formations, reaching the maximum abundance in the old-growth aspen forests, spruce forests and floodplain tree-like willows. The data obtained should be taken into account when taking measures to protect and monitor *L. pulmonaria* populations, predict the species status in the conditions of global climate change and disturbed habitats.

Keywords: *Lobaria pulmonaria*, lichen, ecological physiology, CO_2 -gas exchange, environment, taiga zone, European Northeast

Введение

Лишайники являются неотъемлемым компонентом многих экосистем и растительных сообществ, встречаются в тундре, пустынях, высокогорьях, однако наиболее благоприятными для них являются лесные местообитания. Здесь меньше колебания температуры, влажности, освещенности, больше пригодных для заселения субстратов. Поэтому лишайники являются одними из основных компонентов биоразнообразия в бореальных экосистемах.

В настоящее время список лишайников таежной зоны Республики Коми (РК) включает 866 видов, 82 из них подлежат охране [1,2], в их числе *Lobaria pulmonaria* (лобария легочная). Это вид с категорией статуса охраны 2 (уязвимый вид с сокращающейся численностью) охраняется на региональном [3] и федеральном уровнях [4].

Lobaria pulmonaria (L.) Hoffm. (порядок *Peltigerales* W.Watson, сем. *Lobariaceae* Chevoll.) – крупнолистоватый лишайник с обширным ареалом, охватывающим Европу, Азию, Африку, Северную Америку и Австралию [5]. Еще в начале XX в. этот вид был широко распространен в лесной зоне Европы, но за прошедшее время его встречаемость значительно снизилась вследствие исчезновения коренных лесов и аэротехногенного загрязнения среды.

В Республике Коми наиболее высокие показатели обилия *L. pulmonaria* отмечены в южных и центральных районах [6]. Лишайник произрастает преимущественно на стволах осины в старовозрастных осиновых лесах, возникших на месте гарей. В ходе сукцессии осинники постепенно сменяются темнохвойными лесами, встречаемость и обилие вида в них снижаются. Вторым важным биотопом являются влажные долинные и приручейные ельники. Эти участки леса представляют собой рефу-

гиумы и служат ключевыми местообитаниями для многих редких видов лишайников, в том числе *L. pulmonaria*. Здесь лишайник обычно растет на коре рябины, реже на других древесных породах (ива, береза, ель, ольха). На севере таежной зоны лобария легочная отмечается реже, главным образом, в пойменных ивняках на стволах древовидных ив. Сходные местообитания и субстраты этот вид заселяет в предгорных и горных районах западного макросклона Северного и Приполярного Урала. Несмотря на довольно широкое распространение, *L. pulmonaria* имеет сравнительно узкую экологическую приуроченность. Лишайник требователен к среде обитания. Обычно он поселяется на высоте 1–2 м (иногда до 7–8 м) на влажной, часто замшелой коре нижней части стволов лиственных и хвойных деревьев (рис. 1). Для нормального роста и размножения лишайника наиболее важны высокая влажность окружающего воздуха и достаточная освещенность. Значение имеют также свойства коры форофита, возраст и категория жизненности дерева, диаметр, экспозиция и наклон ствола.

Таллом (слоевище) лишайника представляет собой сплетение гиф микобионта (аскомицеты), куда интегрированы клетки фотобионта (зеленые водоросли и/или цианопрокариоты) [7]. *L. pulmonaria* – трехкомпонентный лишайник, основным фотобиотом которого является зеленая водоросль рода *Dictyochloropsis*. Цианобактерии рода *Nostoc* заключены в специальных образованиях – цефалодиях и осуществляют биологическую фиксацию атмосферного азота. В сухой биомассе талломов *L. pulmonaria* концентрация углерода и азота – основных биогенных элементов – составляет в среднем 44 и 2.2% [8]. Примерно половина сухой массы представлена растворимым белком, что в значительной степени обусловлено доминированием грибного компонента.

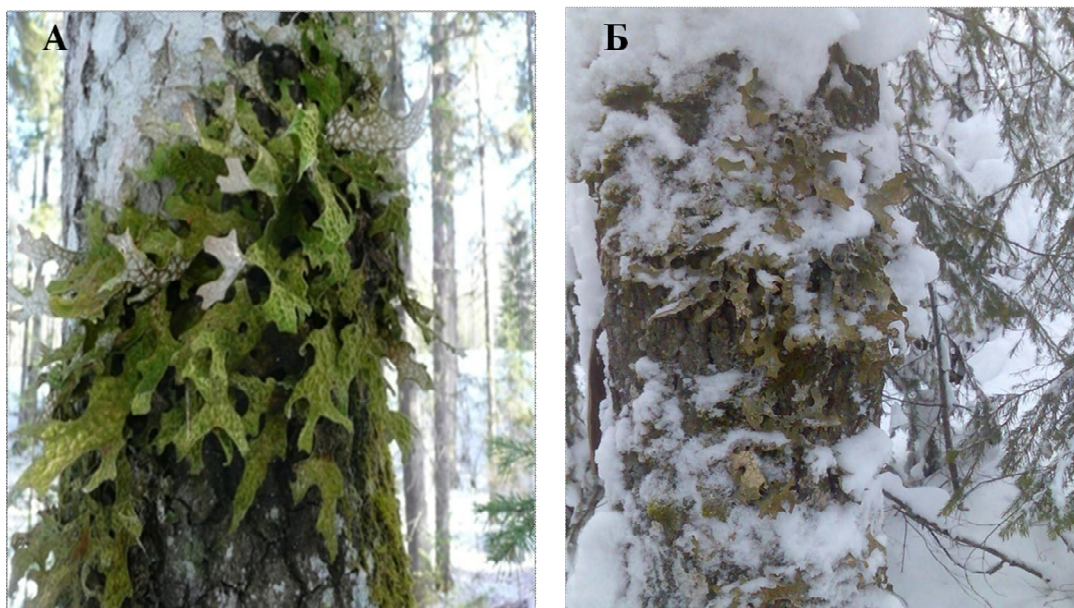


Рис. 1. Лишайник *Lobaria pulmonaria* в природе. Внешний вид талломов в ранне-весенний (апрель (А)) и зимний периоды (январь (Б)). Фото. И.В.Далькэ.

Fig.1. Lichen *Lobaria pulmonaria* in natural habitat. Appearance of thalluses in early spring (April) and winter period (January). Photo by I.V. Dal'ke.

Среди лишайников с листоватым талломом *L. pulmonaria* является одним из наиболее быстро растущих видов [9]. По оценке Muir с соавт. [10], прирост таллома составляет в среднем 4 мм/год, а в отдельных случаях может достигать 1 см. Для роста талломов благоприятно наличие световых окон в лесном пологом [11]. Годичный прирост *L. pulmonaria* на 15% больше в окнах разновозрастных древостоев, чем в затененных местообитаниях. В листопадных лесах на юго-востоке Канады наиболее благоприятными для роста лишайника являются переходные (весенний и осенний) периоды с относительно теплой и влажной погодой [12].

В данной работе приведены результаты изучения эколого-биологических свойств *L. pulmonaria* в условиях подзоны средней тайги. Нами сфокусировано внимание на сезонных и суточных изменениях функциональной активности лишайника, чтобы оценить его реакцию на воздействие природно-климатических факторов среды.

Материал и методы

Исследования проводили в 2012 – 2015 гг. в полевых и лабораторных условиях. В опытах использовали талломы лишайника, обитающего в старовозрастном осиннике с примесью ели и пихты в древостое вблизи г. Сыктывкара (61°34' с.ш., 50°33' в.д.). Освещенность, температуру и относительную влажность воздуха (ОВВ) в местообитании измеряли с помощью регистрирующего устройства LI-1400 (LI-COR, США) с набором метеорологических датчиков.

Изучение анатомо-морфологической структуры талломов осуществляли с помощью световой (Axiovert 200M, Carl Zeiss, Германия) и сканирующей микроскопии (Tesla BS 300, Чехия). Поперечные срезы толщиной около 30 мкм готовили на вибрационном микротоме для мягких тканей. Просмотрено по 12–15 срезов с 8–10 типичных талломов молодого и зрелого возраста.

Фотосинтетические пигменты экстрагировали из периферийной части слоевища смесью ацетона с диметилсульфоксидом (ДМСО) в соотношении 1:2. Содержание зеленых и желтых пигментов определяли спектрофотометрически на приборе UV-1700 (Shimadzu, Япония) при длинах волн 662, 644 нм (хлорофиллы а и б) и 478 нм (каротиноиды).

Для анализа липидов образцы талломов фиксировали жидким азотом и высушивали лиофильно с помощью FreeZone 2.5L (Labconco, США). Липиды экстрагировали смесью хлороформа и метанола. Объединенные экстракты отмывали от нелипидных примесей, растворитель отгоняли на ротационно-вакуумном испарителе и взвешивали. Выделение различных групп липидов осуществляли с применением классических методов липидологии [13].

Жирные кислоты (ЖК) анализировали в виде их метиловых эфиров, получаемых кипячением в 5%-ном растворе HCl в метаноле в течение 1 ч. Полученные эфиры анализировали на газо-жидкостном хроматографе «Хроматэк. Кристалл 5000.1» (Россия) с использованием капиллярной колонки длиной 105 м и диаметром 0.25 мм «RESTEK»

(США) в изотермическом режиме. Активность перекисного окисления липидов определяли по накоплению продуктов реакции с тиобарбитуровой кислотой [14].

CO₂/H₂O-газообмен в природных условиях измеряли с помощью портативной системы ADC LCPro⁺ (ADC BioScientific Ltd, Англия), в лаборатории чаще использовали ИК-газоанализатор LI-7000 (LI-COR, США) [15]. В полевых опытах таллом зажимали в листовой камере портативной фотосинтетической системы и адаптировали около 2 мин. Затем проводили серию измерений газообмена с интервалом записи данных 1 мин. При работе на LI-7000 слоевища помещали в термостатируемую листовую камеру объемом 30 см³. Через камеру прокачивали атмосферный воздух. В качестве источника света использовали лампу ДРЛФ-1000 (Россия).

Для изучения зависимости нетто-поглощения CO₂ от уровня оводненности талломы сначала насыщали влагой, помещая их на 45 мин в воду, затем в эксикатор с хлоридом кальция. Определения CO₂/H₂O-обмена проводили сразу после гидратации и далее в течение 6 ч по мере потери талломами всей поглощенной влаги. Относительное содержание воды в талломе (ОСВ, %) рассчитывали: $OSB = [(M_{сыр} - M_{сух}) \cdot 100] / [(M_{сыр} \text{ насыщ.} - M_{сух})]$, где $M_{сыр}$ – масса сырого таллома (г), $M_{сух}$ – масса полностью высушенного таллома (г), $M_{сыр} \text{ насыщ.}$ – масса таллома, полностью насыщенного водой (г).

Чтобы оценить способность лишайника поглощать воду из окружающей атмосферы, воздушно-сухие талломы экспонировали в насыщенную водой замкнутой камере (ОВВ 95±1% и температура 20.8±0.2 °C) и регистрировали изменение массы талломов во времени, не вынимая их из камеры. Талломы лишайника находились в камере в подвешенном состоянии.

Температуру замерзания воды в талломах определяли в разные сезоны года с помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC-60 (Shimadzu, Япония). Образцы помещали в алюминиевый контейнер объемом 5 мм³ и охлаждали со скоростью 1 °C/мин от +5 °C до -30 °C, непрерывно регистрируя интенсивность тепловыделения. Температуру кристаллизации воды определяли по началу пика фазового перехода. После измерений материал высушивали при 105 °C до постоянной массы. Оводненность оценивали по разности сырой и сухой массы объекта. Количество претерпевшей фазовый переход воды определяли по формуле: $m = 335Q$, где Q – тепловой эффект при замерзании воды (Дж), 335 – удельная теплота льдообразования (Дж/кг).

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica 10 (StatSoft Inc., США). В таблицах и на рисунках приведены средние арифметические значения и их стандартные ошибки. Биохимические анализы выполнены в 3–5-кратной биологической и 2–3-кратной аналитической повторности. Газометрические показатели определяли в 5–8-кратной биологической повторности.

Результаты и обсуждение

Анатомо-морфологическая структура.

Таллом *L. pulmonaria* гетеромерного типа толщиной 180–280 мкм, более толстый в местах формирования ризин (рис. 2, табл. 1). Верхний (коровый) слой, 30–35 мкм толщиной, образован плотно прилегающими друг к другу гифами гриба. Четко очерченный альгальный (водорослевый) слой, 45–48 мкм толщиной, сложен из клеток зеленой водоросли диаметром около 5 мкм.

Под слоем клеток зеленой водоросли рыхло расположены гифы гриба диаметром 4.5 мкм, формирующие сердцевину, толщина которой, в значительной степени, определяет толщину слоевища. В местах, свободных от ризин, толщина медуллярного (сердцевинного) слоя составляет в среднем 90–100 мкм, в области формирования ризин может достигать 240 мкм. В лопастях лишайника образуются тяжи из плотно упакованных грибных гифов, придающие поверхности таллома своеобразный

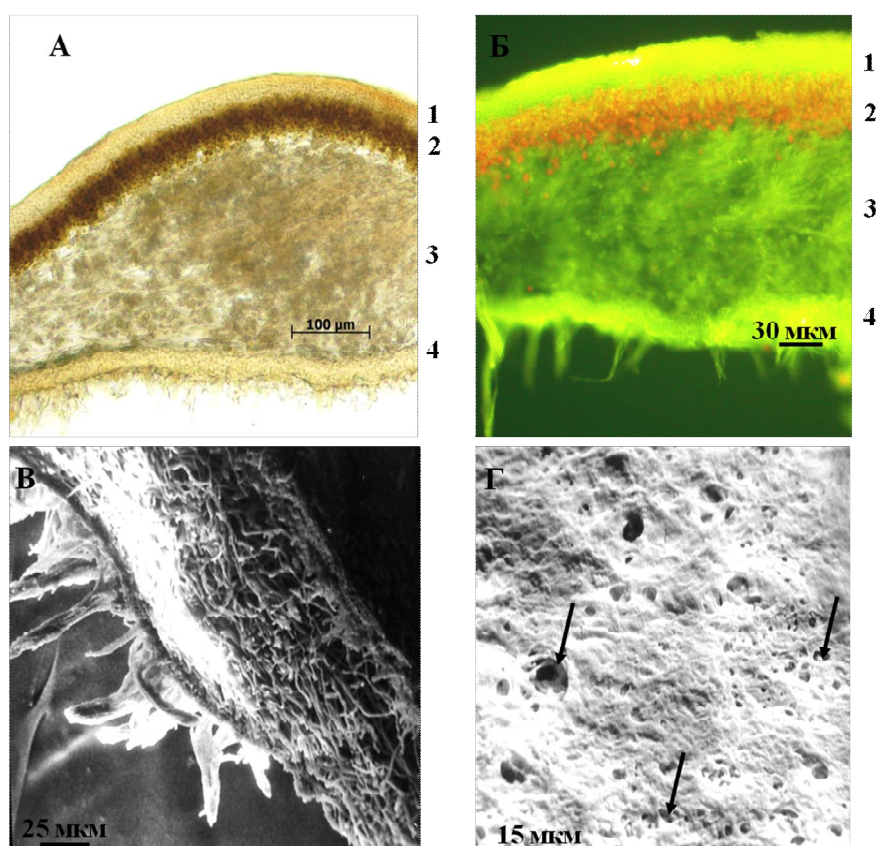


Рис. 2. Поперечный срез (А–В) и поверхность нижнего корового слоя (Г) таллома *Lobaria pulmonaria*: 1 – верхний коровый слой; 2 – альгальный слой; 3 – медуллярный слой (сердцевина) и 4 – нижний коровый слой. Остальные объяснения в тексте.

Fig. 2. Cross-section (A–B) and the lower bark layer surface (Г) of *Lobaria pulmonaria* thallus: 1 – upper bark layer; 2 – algal layer; 3 – medullary layer and 4 – lower bark layer. Other explanations see in the text.

Таблица 1

Показатели анатомо-морфологической структуры талломов *Lobaria pulmonaria*

Table 1

Indicators of anatomical and morphological structure of *Lobaria pulmonaria* thalluses

Вариант*	Толщина, мкм					Диаметр гифных гиф, мкм	Диаметр клеток водоросли, мкм
	Таллом	Верхний коровый слой	Водорослевый слой	Сердцевина	Нижний коровый слой		
Молодой	$\frac{191 \pm 22^{**}}{250 \pm 20}$	31 ± 6	44 ± 6	89 ± 18	25 ± 3	4.5 ± 0.9	5.0 ± 0.7
Зрелый	$\frac{181 \pm 36}{285 \pm 20}$	34 ± 8	48 ± 6	98 ± 16	27 ± 3	4.6 ± 0.6	5.5 ± 0.7

Примечание: *Представлены разные участки таллома: молодой – краевой участок таллома, зрелый – участок таллома ближе к месту прикрепления лишайника к субстрату; **над чертой – вне зоны ризин, под чертой – в зоне ризин.

Note: *Different parts of the lichen thallus are presented: young – marginal part of the lichen thallus, mature – part of the thallus near the lichen attachment to the substrate; ** above the line – out of the rhizine zone, under the line – in the rhizine zone.

сетчатый внешний вид и прочность. В местах расположения тяжелой толщина таллома составляет 240–280 мкм. Нижний коровый слой, толщиной 25–27 мкм, сложен плотно упакованными гифами и имеет выросты (ризиды), обеспечивающие прикрепление таллома к субстрату. Для улучшения аэрации внутренней части слоевища на нижней стороне формируются специальные отверстия до 13 мкм в диаметре.

Состав и сезонные изменения содержания липидов. Липиды являются гетерогенными соединениями, липидные компоненты входят в состав клеточных мембран, вовлекаются в различные физиолого-биохимические процессы, участвуют в защитных реакциях. Результаты наших исследований показали, что на долю липидов приходилось от 29 до 54% экстрактивных веществ талломов *L. pulmonaria* (табл. 2). Содержание липидов в сухой биомассе талломов варьировало от 7 до 13 мг/г. Их концентрация была заметно выше в зимне-весенний период. В составе липидов *L. pulmonaria* обнаружены нейтральные липиды (НЛ), фосфолипиды (ФЛ), бетаиновые липиды (БЛ) и гликолипиды (ГЛ). На долю НЛ приходилось от 66 до 83 % суммы всех экстрагированных липидов. Пул НЛ включает три- и диацилглицерины, стериды и свободные жирные кислоты. Большинство НЛ являются запасными веществами, другие участвуют в метаболизме или служат структурными соединениями. ФЛ выполняют преимущественно структурную функцию, входят в состав клеточных мембран. Их доля варьировала от 9 до 27%. Бетаиновые липиды – это продукт биосинтеза водорослевого компонента лишайника, на их долю приходилось 3–8% всех липидов. Доля ГЛ составляла менее 1%. Однако эти липиды чрезвычайно важны для жизнедеятельности лишайникового организма, так как входят в состав мембран фотосинтетического аппарата фотобионта.

Таблица 2

Состав и содержание липидов в талломах *Lobaria pulmonaria*, мг/г сухой массы (2013 г.)

Table 2

Composition and content of lipids in *Lobaria pulmonaria* thalluses, mg/g of dry mass (2013)

Липиды	Январь	Апрель	Июнь	Ноябрь
Экстрактивные вещества	21.7±1.7	23.7±3.8	29.2±0.2	19.2±2.0
Сумма липидов в экстрактах	11.2±0.9	12.8±1.3	8.5±0.3	6.8±1.5
Гликолипиды	0.07±0.01	0.09±0.02	0.09±0.02	0.04±0.01
Фосфолипиды	1.05±0.12	2.5±0.2	1.38±0.04	1.88±0.17
Нейтральные липиды	9.2±1.2	9.85±1.2	6.3±0.30	4.5±1.5
Бетаиновые липиды	0.82±0.01	0.35±0.03	0.72±0.1	0.39±0.02

Жирнокислотный анализ выявил присутствие в талломах следующих основных насыщенных (НЖК) и ненасыщенных жирных кислот (ННЖК) – пальмитиновой (C16:0), стеариновой (C18:0), олеиновой (C18:1), линолевой (C18:2) и линоленовой (C18:3) (табл.3). Среди ЖК преобладала линоленовая, на ее долю приходится свыше 50% всех ЖК. Содержание ННЖК было в три–пять раз больше,

Таблица 3

Содержание метиловых эфиров жирных кислот в талломах *Lobaria pulmonaria*, % от суммы метиловых эфиров жирных кислот

Table 3

The content of fatty acids methyl esters in *Lobaria pulmonaria* thalluses, % of total fatty acids methyl esters

Дата	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	НЖК	ННЖК	ННЖК/НЖК
13.07.12	20.35	4.37	18.97	51.06	4.94	24.72	75.28	3.0
13.11.12	15.79	2.62	13.77	56.8	11.00	18.41	81.59	4.4
15.01.13	16.21	2.57	13.95	53.37	13.90	18.78	81.22	4.3
03.04.13	14.94	2.35	12.21	57.38	13.12	17.29	82.71	4.8
24.04.13	17.39	3.67	13.76	57.62	7.55	21.06	78.94	3.7

чем НЖК. Вклад ННЖК заметно увеличивался в осенне-зимний период и в начале весны, что обусловлено, вероятно, адаптацией к низким температурам. Известно, что увеличение в мембранах ННЖК способствует сохранению их функциональных свойств (текучесть, проницаемость) при отрицательных температурах.

Ненасыщенные жирные кислоты более подвержены липопероксидации, чем насыщенные. Как и ожидалось, низкая интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ), 3.3 нмоль/г сырой массы, имела место зимой, когда талломы находились в анабиозе. Летом уровень ПОЛ был в 25 раз выше. Эта закономерность сохраняется и при пересчете ПОЛ на сумму липидов. Повышение липопероксидации в весенне-летний период обусловлено активацией процессов жизнедеятельности, усилением метаболизма. Возможно также, что образование в результате ПОЛ гидрофильных продуктов окисления меняет структуру липидного бислоя мембран в гидрофобных участках, создавая тем самым условия для пассивного транспорта метаболитов от водоросли к грибу [16].

Таблица 4

Содержание фотосинтетических пигментов в талломах *Lobaria pulmonaria*, мг/г сухой массы

Table 4

Photosynthetic pigments content in *Lobaria pulmonaria* thalluses, mg/g of dry mass

Дата	Хлорофилл	Каротиноиды	Хлорофилл Каротиноиды
14.06.12	1.52 ± 0.19	0.40 ± 0.02	3.8 ± 0.3
02.08.12	2.00 ± 0.23	0.44 ± 0.03	4.6 ± 0.3
13.11.12	1.30 ± 0.06	0.41 ± 0.02	3.2 ± 0.1
13.12.12	1.27 ± 0.12	0.38 ± 0.05	3.3 ± 0.1
03.04.13	1.06 ± 0.12	0.38 ± 0.06	2.8 ± 0.2
24.04.13	0.86 ± 0.05	0.28 ± 0.01	3.1 ± 0.1
24.06.13	1.28 ± 0.19	0.39 ± 0.05	3.3 ± 0.1
29.07.13	1.89 ± 0.08	0.43 ± 0.01	4.4 ± 0.3
11.09.13	2.30 ± 0.30	0.70 ± 0.07	3.3 ± 0.1

Фотосинтетические пигменты являются индикатором фотобионта в лишайниках. Содержание зеленых пигментов в расчете на единицу сухой массы таллома *L. pulmonaria* варьировало от 0.9 до 2.3 мг/г (табл. 4). По нашим подсчетам, на 1 м² таллома приходилось 150 – 180 мг хлорофилла. Это близко к величинам, приводимым для данного вида лишайника, обитающего в юго-западной части Ка-

нады [17]. Следует отметить, что *L. pulmonaria* относится к видам с довольно высоким содержанием хлорофилла *a* – ключевого хлорофилла, входящего в состав реакционных центров фотосистем фотобионта [18].

Максимальное накопление хлорофиллов отмечали ближе к осени. Содержание хлорофиллов в талломах было наименьшим в апреле, что обусловлено их окислительной деструкцией. Талломы характеризовались довольно высоким накоплением каротиноидов. На их долю приходилось около 25% всего пула фотосинтетических пигментов. Судя по изменению величины соотношения хлорофиллы/каротиноиды, относительное содержание желтых пигментов возрастало к весне, что отражает их защитную роль. Каротиноиды способны выполнять антиоксидантные функции, предотвращать избыточное накопление активных форм кислорода, повреждающих клеточные структуры и важные биомолекулы [19, 20]. Следует отметить, что по величине фонда и сезонной динамике фотосинтетических пигментов талломы *L. pulmonaria* сопоставимы с вечнозелеными хвойными древесными растениями таежной зоны [21].

Температура замерзания воды в талломах. В литературе сведения о температуре замерзания воды в организме пойкилогидрических фотоавтотрофов немногочисленны [22]. Для некоторых видов лишайников пограничной считается температура около -5 °C [23]. С помощью метода биологической калориметрии нами впервые были получены данные о температуре фазового перехода вода–лед и количестве перешедшей в лед воды в талломе *L. pulmonaria* (табл. 5). В весенне-летний период (апрель–август) вода в свежесобраных талломах лишайника замерзала при температуре -7.5 °C. С началом осени отмечали достоверное снижение температуры фазового перехода вода–лед. Минимальные значения этого показателя были зарегистрированы в ноябре–декабре. В холодный период года температура замерзания воды в талломах (-11 °C) была на 2-3 °C ниже, чем в теплый. Следует иметь в виду, что в зимние месяцы в районе исследований среднесуточная отрицательная температура воздуха составляет -10...-14 °C, и не исключено понижение температур до -30...-40 °C, что существенно ниже температуры фазового перехода вода–лед в талломах лишайника. По нашим расчетам, кристаллизации могло подвергаться от 26 (январь) до 46% (август) всей присутствующей в талломах воды.

Считается, что в почках хвойных фазовый переход претерпевает гидратационная вода, которая находится в растворимой фазе цитоплазмы [24]. По мнению других авторов [25], при снижении

температуры до -15 °C кристаллизуется свободная вода в межклетниках. Н. Nağapczyk с соавт. [26], используя гравиметрический и метод ядерного магнитного резонанса, выделили в талломах *Umbilicaria aprina* соответственно две (слабо и сильно связанную) и три фракции воды (слабо, сильно и очень сильно связанную). Согласно данным работы [23], при постепенном охлаждении слоевищ этого лишайника до -20 °C клеточная вода диффундировала из клеток зеленой водоросли и гриба и кристаллизовалась на поверхности гиф в межклетниках медуллярного и альгального слоев, обычно заполненных воздухом. Потерявшие воду клетки зеленой водоросли сжимались, а гифы гриба образовывали пустотелые трубки. В результате образующийся в межклетниках лед не повреждал таллом. При согревании таллома клетки водоросли и гриба поглощали талую воду из межклетников и вновь становились тургесцентными.

Водный обмен. Оводненность лишайников и, следовательно, их физиологическая активность полностью зависят от наличия влаги в окружающей среде. При минимальном содержании воды (5–10%) лишайники переходят в состояние криптобиоза [27]. В период выпадения обильных осадков содержание воды в них значительно возрастает, порой превышая сухую массу в 1.5–3 раза.

У гидратированного лишайника *L. pulmonaria* верхний коровый слой эластичный, хорошо пропускает свет к водорослевому слою, который придает таллому зеленую окраску. При подсыхании таллом сжимается, края его скручиваются, площадь таллома сокращается более чем на 30%, и он приобретает серо-коричневую окраску. Свойство таллома *L. pulmonaria* к скручиванию при десикации ранее было отмечено в работе М. Bartak с соавт. [28]. По мнению авторов, это способствует снижению испарения влаги и предотвращает фотодинамическое повреждение клеток фотобионта.

В литературе имеются сведения о том, что сухие лишайники способны поглощать не только капельную воду, но и водяные пары из атмосферного воздуха [29]. Механизм этого процесса имеет чисто физический характер. Нами проведено детальное исследование водопоглощающей и вододерживающей способности талломов *L. pulmonaria* в лабораторных условиях. Воздушно-сухие талломы (массовая доля воды составляла 10.8±0.2%) экспонировали в насыщенной парами воды замкнутой камере и регистрировали изменение их массы. Интенсивное поглощение влаги отмечали в течение первых 0.5–1.0 ч экспозиции (рис. 3). За этот период содержание влаги в талломах увеличилось вдвое, до 20%. В последующие 4 ч оводненность

Таблица 5

Содержание воды и температура фазового перехода вода–лед в талломах *Lobaria pulmonaria*
Table 5
Water content and water-ice phase transition temperature in *Lobaria pulmonaria* thalluses

Показатель	Январь	Апрель	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
Содержание воды, %	61±4.0	51.0±6.8	54.0±2.4	63.0±2.8	70.0±4.7	44.0±4.5
Доля замерзшей, от всей воды	0.26±0.12	0.29±0.05	0.46±0.05	0.39±0.03	0.28±0.02	0.34±0.09
Температура замерзания воды, °C	-8.9±1.5	-7.8±0.4	-7.5±0.3	-8.7±0.4	-9.7±0.9	-10.5±1.0

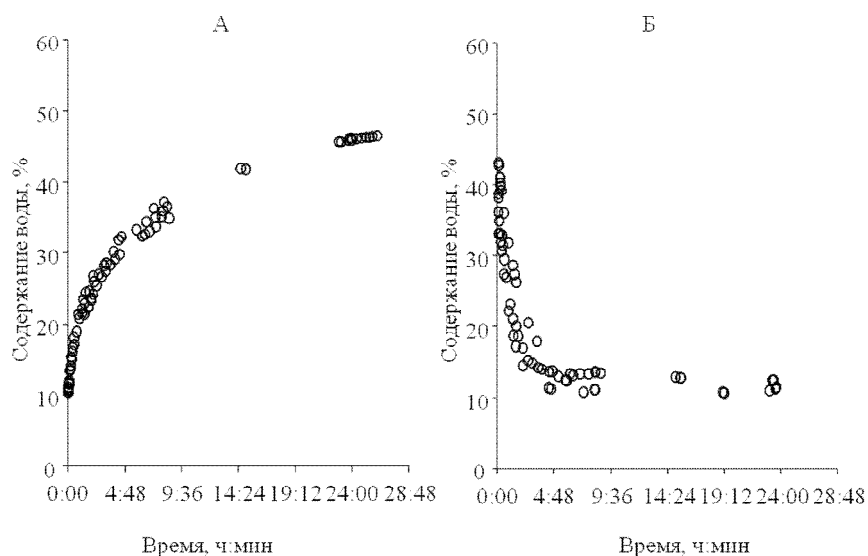


Рис. 3. Динамика поглощения паров воды воздушно-сухими талломами (А) и потеря воды при испарении оводненными талломами лишайника *Lobaria pulmonaria* (Б).

Fig. 3. Dynamics of water vapor absorption by air-dry *Lobaria pulmonaria* thalluses (A) and loss of water at evaporation by hydrated lichen thalluses (B).

талломы возросла до 30%, а за сутки достигла 45%. После перемещения из камеры в комнатные условия (температура воздуха $23 \pm 0.4^\circ\text{C}$, ОВВ $44 \pm 1\%$) талломы быстро теряли влагу, особенно в первые 0.5–1.0 ч. Через 5 ч от начала экспозиции их оводненность уменьшилась до 12%, а спустя сутки составила 10.4%.

Полученные результаты свидетельствуют о способности талломы лишайника *L. pulmonaria* восстанавливать оводненность за счет поглощения

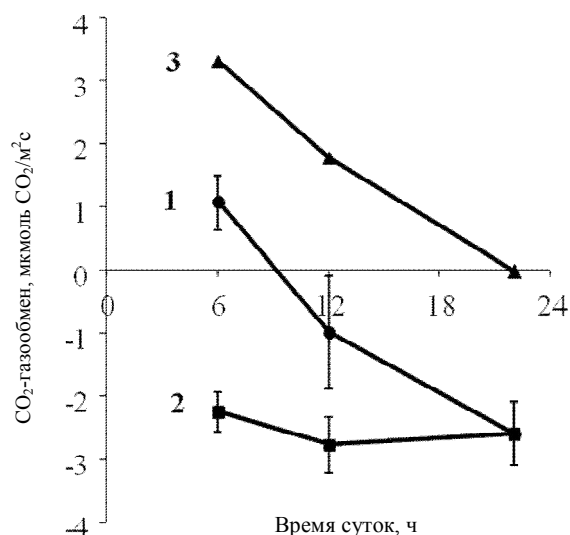


Рис. 4. Суточная динамика CO_2 -газообмена талломы *Lobaria pulmonaria* в природных условиях: 1 – нетто-поглощение CO_2 ; 2 – выделение CO_2 в темноте; 3 –gross-поглощение (июнь, 2013 г.).

Fig. 4. Daily dynamics of CO_2 -gas exchange of *Lobaria pulmonaria* thalluses in natural conditions: 1 – net absorption of CO_2 ; 2 – release of CO_2 in the dark; 3 – gross-absorption of CO_2 (June, 2013).

воды из насыщенной влагой атмосферы. Благодаря этому лишайник сохраняет метаболическую активность в засушливый период вегетации. Так, например, в июне–июле 2013 г. температура среды в полуденные часы иногда поднималась до $28\text{--}30^\circ\text{C}$, а относительная влажность воздуха падала до 40 %. В таких условиях талломы быстро теряли влагу. Днем они обезвоживались практически до воздушно-сухого состояния (содержание воды около 10%), а ранним утром следующих суток их масса повышалась на 10–15 % за счет поглощения атмосферной влаги (ОВВ 70–75 %, температура воздуха $20\text{--}22^\circ\text{C}$). В результате частичной гидратации талломы имели положительный газообмен в утренние часы, тогда как днем у них регистрировали выделение CO_2 (рис. 4). В результате большую часть суток углеродный баланс талломы *L. pulmonaria* был отрицательным. Наши результаты подтверждают мнение ряда авторов [12] о том, что наиболее благоприятными для лишайников лесной зоны являются переходные (весенний и осенний) периоды с относительно теплой и влажной погодой, когда складывается положительный углеродный баланс.

Значительный вклад в CO_2 -газообмен вносит дыхание гетеротрофного микобионта [9]. У большинства лишайников на его долю приходится 90–95% сухой массы таллома. Чтобы охарактеризовать фотосинтетическую способность фотобионта, нами рассчитана интенсивность gross-поглощения CO_2 как сумму нетто-поглощения CO_2 талломами на свету и выделения CO_2 в темноте. Полученная величина существенно выше нетто-поглощения CO_2 , так как отражает поглощение CO_2 на свету фотосинтезирующими клетками зеленой водоросли с учетом возможной рефиксации выделенного при дыхании CO_2 .

Для анализа влияния оводненности на функциональную активность лишайника исследовали динамику изменения CO_2 -газообмена при потере влаги гидратированными талломами в лабораторном эксперименте (рис. 5). Непосредственно перед измерениями воздушно-сухие талломы погружали на 45 мин в воду. В предварительных опытах установлено, что этого времени достаточно для их полного насыщения капельной влагой. Скорость нетто-поглощения CO_2 гидратированных талломы составляла $1.7 \text{ мкмоль } \text{CO}_2/\text{м}^2\text{с}$.

Потеря половины поглощенной при гидратации влаги не повлияла существенно на интенсивность CO_2 -газообмена. Дальнейшее обезвоживание приводило к постепенному снижению нетто погло-

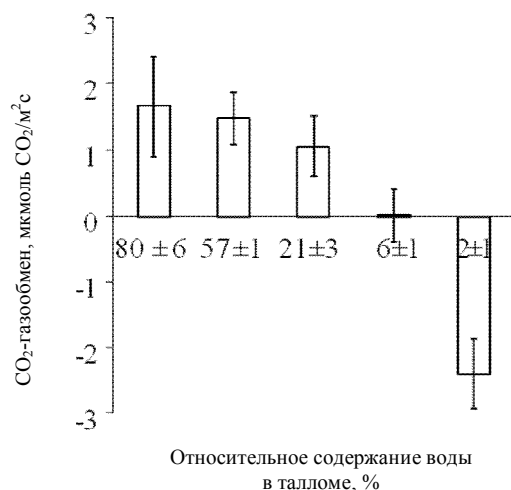


Рис. 5. Влияние потери воды гидратированными талломами *Lobaria pulmonaria* на интенсивность CO₂-газообмена. Определения проведены при освещенности 200 мкмоль квантов/м²с (июнь, 2013 г.).
Fig. 5. Effect of water loss by the hydrated thalluses of *Lobaria pulmonaria* on the intensity of CO₂-gas exchange. The determinations were made at illumination of 200 μmol quanta/m² s (June, 2013).

щения CO₂, вплоть до полного прекращения. У талломов, потерявших всю поглощенную воду, регистрировали интенсивное выделение CO₂. Данные лабораторного эксперимента согласуются с наблюдениями в природе и позволяют полагать, что отмеченные в естественных местообитаниях различия в интенсивности нетто-поглощения CO₂ индивидуальными талломами в значительной мере обусловлены степенью их дегидратации.

Определения, проведенные летом в естественном местообитании лишайника при ОВВ около 55% и температуре воздуха 25°C, показали, что многие талломы на свету имели отрицательный баланс CO₂. У них превалировало выделение CO₂. У некоторых талломов CO₂-газообмен был слабо

выражен (близок к нулю). Другие талломы, наоборот, интенсивно поглощали CO₂. Скорость нетто-поглощения CO₂ у таких талломов достигала 4–6 мкмоль/м²с, что сопоставимо с фотосинтетической активностью травянистых растений лесной экологической группы. Различия в направленности и скорости CO₂-газообмена при близких значениях освещенности косвенно свидетельствуют в пользу предположения о том, что их причиной является разная степень дегидратации талломов.

Для фототрофных организмов свет является жизненно важным фактором среды. Зависимость скорости CO₂-газообмена *L. pulmonaria* от освещенности четко появлялась в лабораторных условиях после насыщения талломов влагой (рис. 6). Скорость нетто-поглощения CO₂ возрастала практически линейно с увеличением интенсивности ФАР до 200–250 мкмоль квантов /м²с. Максимальные значения нетто-поглощения CO₂, 2.5–3 мкмоль/м²с, наблюдали в области ФАР свыше 500–600 мкмоль квантов /м²с. Освещенность в естественных условиях обитания лишайника, как правило, на порядок ниже.

В работе [30], посвященной выявлению экологических особенностей *L. pulmonaria* в Республике Коми, освещенность в местах обитания данного вида оценивалась по 4-балльной шкале. В осинниках и ельниках освещенность стволов с лишайником составляла в среднем 1.9 балла, а в ивняках – 2.7. Инструментальные определения в исследуемом нами местообитании *L. pulmonaria* показали, что интенсивность ФАР изменялась в широких пределах, в зависимости от времени суток и сезона года, наличия или отсутствия облачности. В отдельных случаях на освещенной стороне ствола интенсивность ФАР достигала 500–700 мкмоль /м²с, что эквивалентно 125–175 Вт /м² и составляет в среднем 30% полного солнечного освещения. Однако большей частью освещенность была значительно ниже и варьировала в пределах 50–150 мкмоль квантов /м²с (табл. 6).

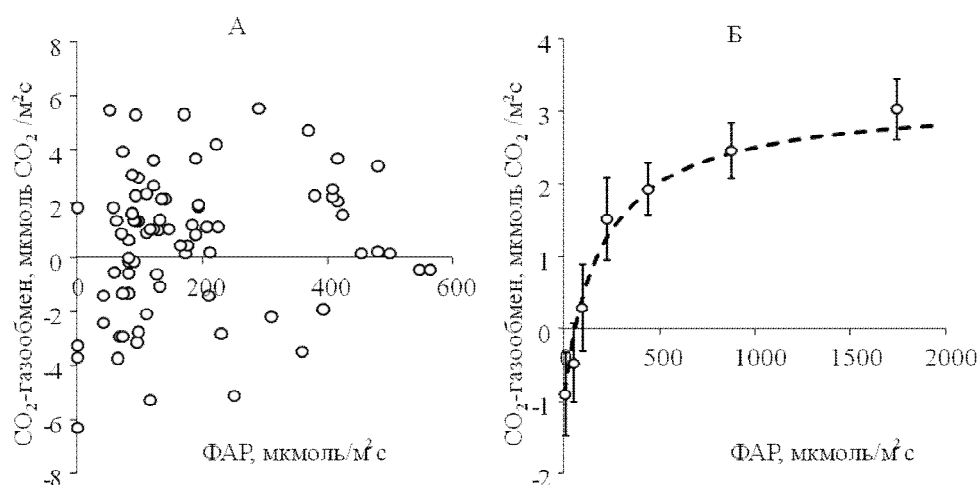


Рис. 6. Интенсивность CO₂-газообмена талломов лишайника *Lobaria pulmonaria* в природных (А) и лабораторных (Б) условиях (июль, 2012 г.). Остальные объяснения в тексте.

Fig. 6. The intensity of CO₂-gas exchange in *Lobaria pulmonaria* thalluses in natural (A) and laboratory conditions (B) (July, 2012). Other explanations see in the text.

Таблица 6
Показатели микроклимата в местообитании
Lobaria pulmonaria (данные 2012 г.)

Table 6

Indicators of the microclimate
in the *Lobaria pulmonaria* habitat (2012 data)

Показатели	Апрель	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Фотосинтетически активная радиация, мкмоль/м ² с	86±2	149±60	44±6	47±14	27±2
Температура воздуха, °С	9.4±0.5	24.6±0.6	27.9±.25	27.0±0.5	16.4±0.5
Относительная влажность воздуха, %	74±3	55±1	61±1	71±1	61±1

Закключение

Итак, нами получена актуальная информация о функциональной экологии охраняемого на территории России и Республики Коми эпифитного крупнолистоватого лишайника *Lobaria pulmonaria*. Впервые установлены сезонные изменения липидного и пигментного комплексов и температуры замерзания воды в талломах. Показано, что фонд зеленых пигментов уменьшается в течение зимы и достигает минимальных значений весной, что обусловлено окислительной деструкцией хлорофиллов. Содержание каротиноидов более стабильно. В зимний период, по сравнению с летним, повышается соотношение ненасыщенных и насыщенных жирных кислот. Температура фазового перехода вода–лед снижается зимой в среднем на 2.5 °С и составляет около -11 °С. В полевых и лабораторных условиях исследованы зависимость СО₂-газообмена от оводненности и освещенности лишайника. Установлено, что гидратированные талломы в оптимальных свето-температурных условиях способны ассимилировать СО₂ со скоростью 3–6 мкмоль/м²с. В естественных местообитаниях интенсивность нетто-поглощения СО₂ талломов сильно варьирует в зависимости от степени дегидратации. В теплый сухой период вегетации положительный газообмен был зарегистрирован лишь в ранние утренние часы, когда талломы гидратировались парами атмосферной влаги.

В целом, можно заключить, что лишайниковый симбиоз представляет собой довольно стабильную надорганизменную фотосинтезирующую систему. Успешная адаптация *L. pulmonaria* к условиям обитания и сезонным изменениям основных факторов среды в значительной степени обусловлена функциональными свойствами лишайника. Благодаря этому лишайник широко распространен в таежных лесах различных формаций, достигая максимального обилия в старовозрастных осинниках, долинных ельниках и пойменных древовидных ивняках.

Полученные данные следует учитывать при разработке мероприятий по охране и проведении мониторинга популяций *L. pulmonaria*, прогнозировании состояния вида при глобальных климатических изменениях и нарушении местообитаний.

Авторы признательны д.б.н. О.А. Розенцвиг за содействие в определении липидов.

Исследования выполнены в рамках Комплексной программы исследований УрО РАН по направлению «Живая природа и климат» (№18-4-4-20; № ГРАААА-А18-1180122901) и темы НИОКТР «Физиология и стресс-устойчивость фотосинтеза растений и пойкилогидрических фотоавтотрофов в условиях Севера» (№ АААА-А17-117033010038-7).

Литература

1. Пыстина Т.Н. Лишайники таежных лесов европейского Северо-Востока: подзоны южной и средней тайги. Екатеринбург, 2003. 239 с.
2. Пыстина Т.Н., Херманссон Я. Разнообразие лишайников Республики Коми: важнейшие итоги и перспективы дальнейших исследований // Современная ботаника в России: Тр. XIII съезда Русского ботанического общества и конференции «Научные основы охраны и рационального использования растительного покрова Волжского бассейна». В 3-х томах. Тольятти: Кассандра, 2013. Т. 1. С. 205 – 207.
3. Красная книга Республики Коми. Сыктывкар, 2009. 791 с.
4. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 885 с.
5. Yoshimura I. The Genus *Lobaria* of Eastern Asia // J. Hatt. Bot. Lab. 1971. № 34. P. 231–264.
6. Семенова Н.А., Пыстина Т.Н. Распространение и экология *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. в южных районах Республики Коми // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. X молодеж. науч. конф. Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2003. С. 195 – 197.
7. Büdel B., Scheidegger C. Thallus morphology and anatomy/Lichen Biology// Ed.T.H.Nash III. Camdridge Univ.Press., 2008. P.40 – 68.
8. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Головки Т.К. Элементный состав некоторых видов лишайников бореальной зоны на европейском Северо-Востоке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 221–225.
9. Palmqvist K. Carbon economy in lichens // New Phytol., 2000. Vol. 148. № 1. P. 11 – 36.
10. Muir P.S., Shirazi A.M., Patrie J. Seasonal growth dynamics in the lichen *Lobaria pulmonaria* // Briologist. 1997. Vol.100. № 4. P. 458 – 464.
11. Coxson D.S., Stevenson S.K. Growth rate responses of *Lobaria pulmonaria* to canopy structure in even-aged and old-growth cedar-hemlock forests of central-interior British Columbia, Canada // Forest Ecology and Management. 2007. № 242. P. 5 – 16.
12. MacKenzie T.D.V., MacDonald T.M., Dubois L.A., Campbell D.A. Seasonal changes in temperature and light drive acclimation of photo-

- synthetic physiology and macromolecular content in *Lobaria pulmonaria* // *Planta*. 2001. Vol. 214. № 1. P. 57 – 66.
13. Кеймс М. Техника липидологии. Выделение, анализ и идентификация липидов. М.: Мир, 1975. 322 с.
14. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts // *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 1968. Vol. 125. № 1. P. 189–198.
15. Далькэ И.В. Изменение CO₂/H₂O-газообмена растений на действие неблагоприятных факторов среды с использованием портативной газометрической системы // Инновационные методы и подходы в изучении естественной и антропогенной динамики окружающей среды: материалы Всероссийской научной школы для молодежи (в 3-х частях). Ч. 2. Семинары. (30 ноября–5 декабря 2009 г., г.Киров). Киров: Изд-во ООО «Лобань», 2009. С. 87 – 94.
16. Вайнштейн Е.А. Регуляторные механизмы лишайникового симбиоза // *Успехи современной биологии*. 1990. Т. 109. Вып. 2. С. 311 – 320.
17. Scofield S.C., Campbell D.A., Christiane F., MacKenzie T.B. Changes in macromolecular allocation in nondividing algal symbionts allow for photosynthetic acclimation in the lichen *Lobaria pulmonaria* // *New Phytologist*. 2003. Vol. 159. № 3. P. 709 – 718.
18. Головки Т.К., Дымова О.В., Табаленкова Г.Н., Пыстина Т.Н. Фотосинтетические пигменты и азот в талломах лишайников бореальной зоны // *Теоретическая и прикладная экология*. 2015. № 4. С. 74–80.
19. Demmig-Adams B. Carotenoids and protection of plants: role for the xanthophylls zeaxanthin // *Biochim. Biophys. Acta*. 1990. № 1020. P. 1 – 24.
20. Gruszecki W., Szymanska R., Fiedor L. Carotenoids as photoprotectors // *Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology* / Eds. T. Golovko et al. Syktyvkar, 2014. P. 161 – 170.
21. Яцко Я.Н., Дымова О.В., Головки Т.К. Пигментный комплекс зимне- и вечнозеленых растений в подзоне средней тайги европейского Северо-Востока // *Ботанический журнал*. 2009. Т. 94. № 12. С. 1812 – 1820.
22. Honneger R. Water relations in lichens // *Fungi in the Environment* / Ed. G.M. Gaad et al. Camb. Univ. Press, 2006. P. 185 – 200.
23. Schroeter B., Scheidegger C. Water relations in lichens at subzero temperatures: structural changes and carbon dioxide exchange in the lichen *Umbilicaria aprina* from continental Antarctica // *New Phytologist*. 1995. Vol. 131. № 2. P. 273 – 275.
24. Миронов П.В., Алаутдинова Е.В., Ренях С.М. Низкотемпературная устойчивость живых тканей хвойных. Красноярск, 2001. 221 с.
25. Бакрадзе Н.Г., Балла Ю.И. О кристаллизации внутриклеточной воды в тканях растений // *Биофизика*. 1983. Т. 28. С. 119 – 121.
26. Haranczyk H., Baciorek M., Olech M.A. Deep dehydration of *Umbilicaria aprina* thalli observed by proton NMR and sorption isotherm // *Antarctic Science*. 2008. Vol. 20. № 6. P. 527–535.
27. Слонов Л.Х., Слонов Т.Л., Ханов З.М. Эколого-физиологические особенности лишайников горной системы центральной части Северного Кавказа. Нальчик: Эльбрус, 2009. 158 с.
28. Bartac M., Solhaug K.A., Vrablicova H., Gauslaa Y. Curling during desiccation protect the foliose lichen *Lobaria pulmonaria* against photoinhibition // *Oecologia*. 2006. Vol. 149. № 4. P. 553 – 560.
29. Green T.G.A., Nash III T.N., Lange O.L. Physiological ecology // *Lichen biology* / Ed. T.N. Nash III. Camb. Univ. Press, 2008. P. 153 – 181.
30. Пыстина Т.Н., Семенова Н.А. Экологические особенности лишайника *Lobaria pulmonaria* (Lobariaceae) в Республике Коми // *Ботанический журнал*, 2009. Т. 94. № 1. С. 48 – 58.

References

1. Pystina T.N. Lishajniki taehnyh lesov Evropejskogo Severo-Vostoka: podzony juzhnoj i srednej tajgi [Lichens of taiga forests of the European Northeast: subzones of southern and middle taiga]. Ekaterinburg, 2003. 239 p.
2. Pystina T.N., Hermansson Ya. Raznoobrazie lishajnikov Respubliki Komi: vazhnejshie itogi i perspektivy dal'nejshih issledovanij [Variety of lichens of the Komi Republic: important results and prospects for further research] // *Sovremennaja botanika v Rossii* [Modern Botany in Russia]: Proc. of XIII Congress of the Russian Botanical Soc. and the Conf. "Sci. bases of protection and rational use of vegetative cover in the Volga basin". In 3 volumes. Tolyatti: Kassandra, 2013. Vol. 1. P. 205 – 207.
3. Krasnaja Kniga Respubliki Komi [The Red Book of the Komi Republic]. Syktyvkar, 2009. 791 p.
4. Krasnaja kniga Rossijskoj Federacii (rastenija i griby) [The Red book of the Russian Federation (plants and fungi)]. Moscow: Partnership of sci. publications KMK, 2008. 885 p.
5. Yoshimura I. The Genus *Lobaria* of Eastern Asia // *J. Hatt. Bot. Lab.* 1971. № 34. P. 231–264.
6. Semenova N.A., Pystina T.N. Rasprostranenie i jekologija *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. v juzhnyh rajonah Respubliki Komi [Distribution and ecology of *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. in the southern regions of the Komi Republic] // *Aktual'nye problemy biologii i jekologii* [Actual problems of biology and ecology]: Reports of X Youth sci. conf. of the Inst. of Biology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS. Syktyvkar, 2003. P. 195 – 197.
7. Büdel B., Scheidegger C. Thallus morphology and anatomy // *Lichen Biology* / Ed. T.H. Nash III. Cambridge Univ. Press., 2008. P. 40 – 68.

8. *Tabalenkova G.N., Dal'ke I.V., Golovko T.K.* Jelementnyj sostav nekotoryh vidov lishajnikov boreal'noj zony na Evropejskom Severo-Vostoke [Elemental composition of some boreal lichen species in the European Northeast] // Proc. of Samara Sci. Centre, RAS. 2016. Vol. 18. № 2. P. 221–225.
9. *Palmqvist K.* Carbon economy in lichens // New Phytol., 2000. Vol. 148. №1. P. 11 – 36.
10. *Muir P.S., Shirazi A.M., Patrie J.* Seasonal growth dynamics in the lichen *Lobaria pulmonaria* // Briologist. 1997. Vol.100. № 4. P. 458 – 464.
11. *Coxson D.S., Stevenson S.K.* Growth rate responses of *Lobaria pulmonaria* to canopy structure in even-aged and old-growth cedar-hemlock forests of central-interior British Columbia, Canada // Forest Ecology and Management. 2007. № 242. P. 5 – 16.
12. *MacKenzie T.D.V., MacDonald T.M., Dubois L.A., Campbell D.A.* Seasonal changes in temperature and light drive acclimation of photosynthetic physiology and macromolecular content in *Lobaria pulmonaria* // Planta. 2001. Vol. 214. № 1. P.57 – 66.
13. *Keits M.* Tehnika lipidologii. Vydelenie, analiz, i identifikacija lipidov [The technique of lipidology. Isolation, analysis, and identification of lipids]. Moscow: Mir, 1975. 322 p.
14. *Heath R.L., Packer L.* Photoperoxidation in isolated chloroplasts // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1968. Vol. 125. № 1. P. 189–198.
15. *Dal'ke I.V.* Izmenenie CO₂/H₂O-gazoobmena rastenij na dejstvie neblagoprijatnyh faktorov sredy s ispol'zovaniem portativnoj gazometricheskoj sistemy [Change of CO₂ / H₂O-gas exchange of plants on the effect of adverse environmental factors using a portable gasometric system] // Innovacionnye metody i podhody v izuchenii estestvennoj i antropogennoj dinamiki okruzhajushhej sredy [Innovative methods and approaches in the study of natural and anthropogenic dynamics of the environment]: Materials of All-Russian sci. school for young people (in 3 parts). Part 2. Seminars. (November 30 – December 5, 2009, Kirov). Kirov: "Loban" Publ., 2009. P. 87 – 94.
16. *Vainshtein E.A.* Reguljatornye mehanizmy lishajnikovogo simbioza [Regulatory mechanisms of lichen symbiosis] // Uspehi sovremennoj biologii [Biology Bulletin Reviews]. 1990. Vol. 109. Issue 2. P. 311 – 320.
17. *Scofield S.C., Campbell D.A., Christiane F., MacKenzie T.B.* Changes in macromolecular allocation in nondividing algal symbionts allow for photosynthetic acclimation in the lichen *Lobaria pulmonaria* // New Phytologist. 2003. Vol. 159. № 3. P. 709 – 718.
18. *Golovko T.K., Dymova O.V., Tabalenkova G.N., Pystina T.N.* Fotosinteticheskie pigmenty i azot v tallomah lishajnikov boreal'noj zony [Photosynthetic pigments and nitrogen in boreal lichen thalluses] // Theoretical and Applied Ecology. 2015. № 4. P. 74–80.
19. *Demmig-Adams B.* Carotenoids and protection of plants: role for the xanthophylls zeaxanthin// Biochim. Biophys. Acta. 1990. № 1020. P. 1 – 24.
20. *Gruszecki W., Szymanska R., Fiedor L.* Carotenoids as photoprotectors // Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology / Eds. T. Golovko et al. Syktывkar, 2014. P. 161 – 170.
21. *Yatsko Ya.N., Dymova O.V., Golovko T.K.* Pigmentnyj kompleks zimnee- i vechnozelenyh rastenij v podzone srednej tajgi evropejskogo Severo-Vostoka [Pigment complex of winter- and evergreen plants in the subzone of the middle taiga of the European Northeast] // J. of Botany. 2009. Vol. 94. № 12. P. 1812 – 1820.
22. *Honneger R.* Water relations in lichens // Fungi in the Environment / Ed. G.M. Gaad et al. Camb. Univ.Press, 2006. P. 185 – 200.
23. *Schroeter B., Scheidegger C.* Water relations in lichens at subzero temperatures: structural changes and carbon dioxide exchange in the lichen *Umbilicaria aprina* from continental Antarctica // New Phytologist. 1995. Vol. 131. № 2. P. 273 – 275.
24. *Mironov P.V., Alautdinova E.V., Repyakh S.M.* Nizkotemperaturnaja ustojchivost' zhivyh tkanej hvojnyh [Low-temperature resistance of the live tissues of conifers]. Krasnoyarsk, 2001. 221 p.
25. *Bakradze N.G., Balla Yu.I.* O kristallizacii vnutrikletочноj vody v tkanjah rastenij [On crystallization of intracellular water in plant tissues]//Biophysics. 1983. Vol. 28. P. 119 – 121.
26. *Haranczyk H., Baciorek M., Olech M.A.* Deep dehydration of *Umbilicaria aprina* thalli observed by proton NMR and sorption isotherm // Antarctic Science. 2008. Vol. 20. № 6. P. 527–535.
27. *Slonov L.Kh., Slonov T.L., Khanov Z.M.* Jekologo-fiziologicheskie osobennosti lishajnikov gornoj sistemy central'noj chasti Severnogo Kavkaza [Ecological and physiological features of lichens of the mountain system of the central part of the North Caucasus]. Nalchik: Elbrus, 2009. 158 p.
28. *Bartac M., Solhaug K.A., Vrablicova H., Gauslaa Y.* Curling during desiccation protect the foliose lichen *Lobaria pulmonaria* against photoinhibition // Oecologia. 2006. Vol. 149. №4. P. 553 – 560.
29. *Green T.G.A., Nash III T.N., Lange O.L.* Physiological ecology // Lichen biology / Ed. T.N. Nash III. Camb.Univ. Press, 2008. P. 153 – 181.
30. *Pystina T.N., Semenova N.A.* Jekologicheskie osobennosti lishajnika *Lobaria pulmonaria* (Lobariaceae) v Respublike Komi [Ecological features of the lichen *Lobaria pulmonaria* (Lobariaceae) in the Komi Republic] // J. of Botany. 2009. Vol. 94. №1. P. 48 – 58.

Статья поступила в редакцию 16.03.2018.

УДК 631.41

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-34-45

ПОТОКИ МЕТАНА НА ПЕРЕХОДНОМ БОЛОТЕ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ РЕСПУБЛИКИ КОМИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕХ ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ

М.Д. СИВКОВ, Е.Н. ПАТОВА

*Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
patova@ib.komisc.ru*

В подзоне средней тайги в 2011–2014 гг. камерным методом измерены годовые удельные потоки метана на евтрофном пойменном болоте, расположенном в бассейне р. Сысола (Республика Коми). Годовая эмиссия метана на исследованном болоте в разные годы составила 15,8 – 36,9 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$, удельные потоки метана в вегетационный период находились в диапазоне от 14,4 до 30,5 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$, в зимний сезон – от 1,4 до 6,4 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$. Максимальные сезонные удельные потоки метана, как и среднесуточные температуры, наблюдали в вегетационном сезоне 2013 г. Доля эмиссий метана зимой в исследованные годы составляла от 8,8 до 19,3% от годовых потоков. Для изучаемого болота получена простейшая модель, базирующаяся на предикторе температуры в 30-сантиметровом торфяном горизонте, с помощью которой возможно с достаточной степенью точности моделировать как летние, так и зимние эмиссии метана. Полученные данные могут быть использованы для оценки региональных потоков метана из переувлажненных переходных болот европейского Северо-Востока.

Ключевые слова: эмиссия метана, переходные пойменные болота, европейский Северо-Восток

M.D. SIVKOV, E.N. PATOVA. METHANE FLUXES FROM THE TRANSITIONAL SWAMP IN THE MIDDLE TAIGA ZONE OF THE KOMI REPUBLIC: RESULTS OF THREE-YEAR OBSERVATIONS

The annual methane fluxes from eutrophic floodplain swamp were studied. The sampling spot is located in the basin of the Sysola River (Komi Republic) in the middle taiga zone (61°33'25.0" N, 50°46'28" E). The vascular plant flora of the examined swamp is represented by *Carex aquatilis*, *C. vesicaria*, *Eriophorum polystachion*, *E. vaginatum*, *Menyanthes trifoliata*, *Comarum palustre*, *Equisetum fluviatile*, *Oxycoccus quadripetalus*, *Andromeda polifolia*, *Alnus incana*, *Betula pubescens*, *Pinus sylvestris*. Moss cover is formed by different species from *Sphagnum* genus with *Sphagnum girgensohnii* as the dominant one. The year-round measurements of the methane emissions were carried out in 2011-2014 by "closed dark chambers" method. We measured the main climatic parameters and environmental factors which affect methane emissions (air and peat temperature at different depths, the level of swamp waters). Methane dynamics in the swamp water was studied. The annual methane emission from the floodplain swamp during research period was in the range of 15.8 - 36.9 g $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$. During vegetation period, methane fluxes ranged from 14.4 to 30.5 g $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$, in winter – from 1.4 to 6.4 g $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$. The maximum seasonal fluxes of methane were observed during growing season of 2013. That was the period with the highest average daily temperatures. Methane emission during winter was from 8.8 to 19.3% from the annual fluxes. For the studied swamp, we obtained the simplest prediction model which is based on temperature in a 30 cm peat horizon as a predictor. It allows to model fluxes with high sufficiency and accuracy for both summer and winter seasons. In future, the obtained data can be used to estimate regional flows of methane from the transitional floodplain swamps in the European Northeast.

Keywords: methane emission, transitional floodplain swamps, European Northeast

Введение

В связи с проблемой климатических изменений актуальной задачей является оценка выделения парниковых газов различными природными ландшафтами. Метан – парниковый газ, который после диоксида углерода находится на втором месте по значимости влияния на изменения климата [1]. Один из основных источников парниковых газов в северных регионах – переувлажненные заболоченные комплексы, где в анаэробных условиях разложение органических веществ приводит к преимущественному образованию метана. Для северо-востока европейской части России болота, наряду с лесами, являются ведущими компонентами ландшафта и занимают около 10 % площади [2]. Необходимо отметить, что в бореальной зоне спектр болот очень разнообразен и включает в северной и средней тайге олиготрофные грядово-мочажинные сфагновые, мезотрофные сфагновые, низинные и переходные евтрофные пойменные болота; в северной и крайнесеверной тайге – крупнобугристые и аапа-болота [2]. При этом исследования эмиссионной составляющей углеродного цикла болотных комплексов средней тайги на европейском Северо-Востоке немногочисленны, спектр исследованных болотных экосистем также довольно узок и ограничивается мезоолиготрофным болотом, где в рамках двух международных проектов CarboNorth и ПРООН/ГЭФ выполнен комплекс междисциплинарных исследований, направленных на изучение эволюционных, структурных и функциональных особенностей болота Медла-Пэв-Нюр [3–5]. Для данного болота приведена характеристика потоков углерода в сезонной динамике. Для среднетаежной

зоны, густо пересеченной речными долинами, широко распространенным типом болотных экосистем являются евтрофные пойменные болота. Они формируются при зарастании многочисленных пойменных водоемов, образующихся при меандрировании северных рек и могут занимать площади до нескольких десятков километров. В основном это молодые, быстро формирующиеся в условиях современного климата комплексы, в которых идет активное накопление органического вещества и обмен углерода с атмосферой. Пойменные болота могут быть использованы в качестве индикаторов современных климатических изменений, при этом исследования эмиссий парниковых газов на пойменных болотах среднетаежной зоны европейской части России немногочисленны [6], для Западной Сибири такие сведения представлены в ряде работ [7–13]. Экспериментальные данные по годовым потокам метана для переходных болот северо-востока европейской части России отсутствуют, что и определяет актуальность проведенных исследований.

Цель работы – оценка годовых удельных потоков метана на переходном болоте в подзоне средней тайги в зависимости от факторов окружающей среды.

Объекты и методы исследований

Объект исследований. Измерения потоков метана проведены на участке переходного болота (озерной сплавины) с минеротрофным питанием. Болото формируется в прибрежной полосе старичного озера длиной около 1 км и шириной до 90 м (61°33'25.0" с.ш., 50°46'28" в.д.) (рис. 1). Озеро расположено в бассейне р. Сысола (Сыктывдинский район, Республика Коми). Водный режим озе-

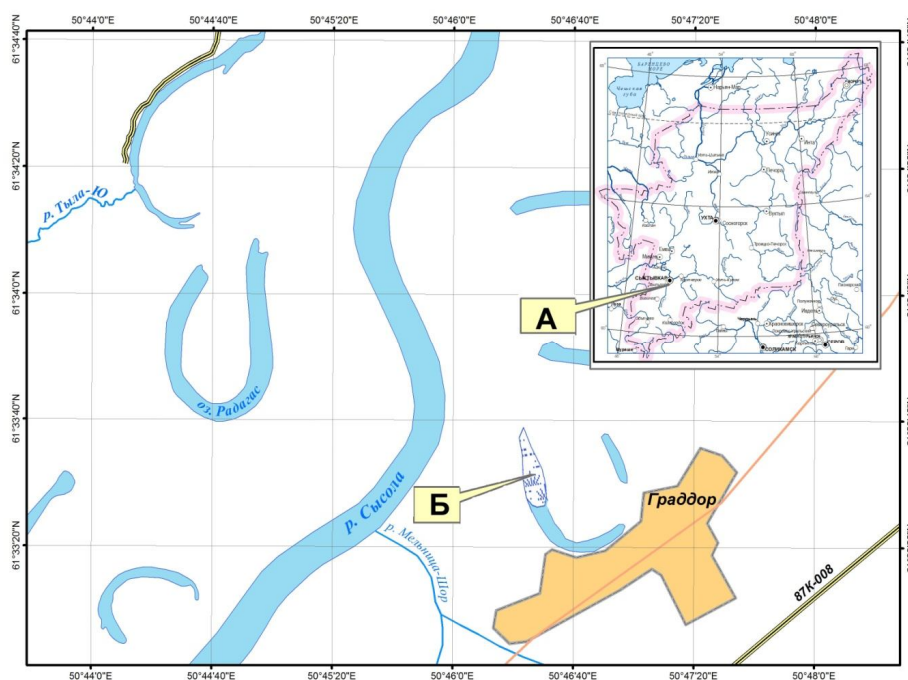


Рис. 1. Карта-схема района исследований. Локализация исследуемого болота: А – на территории Республики Коми, Б – в пойме старичного озера в бас. р. Сысола.

Fig. 1. Map-scheme of the research area. Localization of the investigated floodplain swamp: А – on the territory of the Komi Republic, Б – in the floodplain of the old lake in the Sysola river basin.

ра связан с гидрологическим режимом реки. Озеро постепенно зарастает, превращаясь в болото. В озерной котловине береговую зону занимают островки переходного болота шириной 5 – 50 м, пробные площадки были расположены в его наиболее широкой части. Средняя мощность торфяной толщи в середине исследованного участка достигала 1 м, она постепенно уменьшается в направлении уреза воды. Болотные воды постоянно находятся на высоком уровне. В растительном покрове исследованного болота сосудистые растения представлены *Carex aquatilis*, *C. vesicaria*, *Eriophorum polystachion*, *E. vaginatum*, *Menyanthes trifoliata*, *Comarum palustre*, *Equisetum fluviatile*, *Oxycoccus quadripetalus*, *Andromeda polifolia*, *Alnus incana*, *Betula pubescens*, *Pinus sylvestris* и др. Моховой покров в основном формируют сфагновые мхи, доминирует *Sphagnum girgensohnii*.

Для круглогодичных измерений удельных потоков метана выбран участок с растительным сообществом, наиболее типичным и широко представленным на исследованном болоте. Участок расположен в центральной части болота, доминируют пушицы и осоки, нижний ярус сформирован сфагновыми мхами и клюквой (рис. 2).



Рис. 2. Растительные сообщества исследованного болота. А – болотные комплексы, Б – площадка измерений метана.
Fig. 2. Vegetation communities of the investigated floodplain swamp. А – bog complexes, Б – methane measurement site.

Измерение потоков метана. Круглогодичные измерения эмиссии метана проведены в 2011–2014 гг. За вегетационный сезон принимали период с весны до осени (май–октябрь) – с момента схода снега на участках и до формирования снежного покрова, за зимний – период от установления снежного покрова до его схода (ноябрь–апрель). Измерения проведены методом закрытых темных камер [14, 15]. На участке были установлены две металлические рамки размерами 40х40 см² с желобом для создания

гидрозатвора. Со специально оборудованных мостков пробы воздуха начинали отбирать спустя 3–5 мин после установки камеры на рамку, в которой применяли активное вентилирование. Летом отбор газовых проб выполняли три раза за сутки утром (5⁰⁰–7⁰⁰), днем (10⁰⁰–13⁰⁰) и вечером (16⁰⁰–23⁰⁰), в остальные сезоны года по одному разу (обычно около полудня) с интервалом измерений в 3–7 суток. Зимой измерения проводили в периоды потеплений, снег убирали заблаговременно, измерения начинали спустя 1 час после его уборки. Газовые пробы отбирали в 20-миллиметровые трехкомпонентные шприцы APEXMED (Россия) четыре раза в течение 15 мин и анализировали их в лабораторных условиях не более чем через 3–12 ч после отбора.

Измерения метана выполняли на газовом хроматографе Цвет-800 (Россия) с пламенно-ионизационным детектором. Использовали 2-метровую стальную колонку с сорбентом Porapak N 80/100. Газ-носитель – гелий, расход его через колонку составлял 30 мл мин⁻¹, водорода – 40 мл мин⁻¹, воздуха – 300 мл мин⁻¹. Температура колонки 50 °С. Для калибровки хроматографа использовали две стандартные смеси производства «Линде-Газ-Рус» (Россия) с концентрациями метана 5,0 ppm и 17,5 ppm, имеющих абсолютную погрешность 4%. Калибровку выполняли перед каждой серией измерений после двухчасового прогрева прибора.

Температура воздуха и торфа. Измерения температуры воздуха в приземном слое выполнены с использованием станции микроклимата НОВО-021 (США). Датчик для измерения температуры воздуха в приземном слое (20–30 см) размещался в солнечном экране микростанции НОВО. Температуру торфа измеряли на глубинах 1, 5, 10, 20, 30, 40, 60 см от уровня мохового покрова температурными логгерами DS-1921, DS-1923 (США) с погрешностью ±0,5 °С (рис. 3, 4). В годичной динамике температура измерялась с интервалом 3 ч. Датчики устанавливали весной сразу после схода снега. Через год достали для считывания данных, предварительно рядом установив другие датчики еще на год.

Уровень болотных вод (УБВ). Сразу после отбора проб метана измеряли уровень болотных вод в предварительно установленных рядом с участками пластмассовых трубках. Измерения выполняли весь сезон до замерзания в трубках воды. УБВ рассчитывали как разницу между текущим показателем и максимальным значением за исследованные годы и принимали как величину с отрицательным знаком.

Динамика метана в болотной воде. Для оценки содержания метана в болотной воде поль-

зовались описанной методикой [16]. В разные сезоны года болотную воду отбирали в трехкомпонентные 20 мл шприцы с глубин 10, 20, 30, 40 и 60 см от поверхности моховой дернины с помощью тонкой металлической трубки. Сразу же вытесняли из шприца 10 мл воды и заполняли атмосферным воздухом. После 3–5 мин встряхивания 2 мл газовой пробы из шприца вводили в 12 мл флаконы Labco Exetainer (Англия) для отбора газовых проб. Измерение концентрации метана в газовой фазе выполняли на газовом хроматографе, растворимую фазу CH_4 в воде рассчитывали с учетом температуры воды и растворимости метана.

Динамика метана под сезонно мерзлым слоем болота. Для оценки накопления метана под сезонно мерзлым слоем, сформированным на поверхности болота, весной были выполнены исследования динамики эмиссии этого газа после принудительного удаления замерзшего слоя. В четырех точках, рядом с расположенными стационарными рамками, выпиливали с помощью металлического цилиндра круги диаметром 20 см и удаляли со-

стоящие из льда замерзшие слои. В лед плотно устанавливали металлическую вентилируемую камеру диаметром 20 см, открытым концом слегка углубив в болотную воду, и дважды выполняли отбор газовых проб в 5-минутной экспозиции. Измерения повторяли с интервалом 1–2 суток до стационарного состояния эмиссии метана.

Расчет удельных потоков метана. Удельные потоки (УП) метана рассчитывали по результатам измерений CH_4 в камере, используя линейную регрессию, в расчет принимали только регрессии с коэффициентами детерминации не ниже 0,999. Исходные данные для сезонных вычислений УП метана составляли временные ряды из 14–30 суточных значений за вегетационный сезон и из 6–8 суточных результатов УП метана в зимний сезон. Суточные значения УП рассчитывали по одному измерению или принимали как среднее из трех измерений за сутки. Сезонные УП метана за вегетационный и зимний периоды рассчитывали аппроксимированием сезонных динамических кривых полиномиальной функцией. Для определения слоя тор-

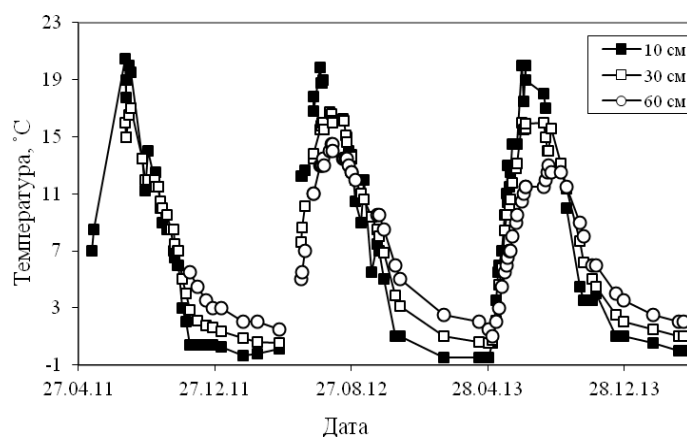


Рис. 3. Температурный режим торфа за трехлетний период (2011–2014 гг.) на глубинах 10, 30, 60 см. На графике отмечены температуры в дни измерений эмиссии метана.

Fig. 3. Temperature regime of peat for a three-year period (2011–2014) at a depth of 10, 30, 60 cm. The graph shows the temperatures in the days of methane emissions measurements.

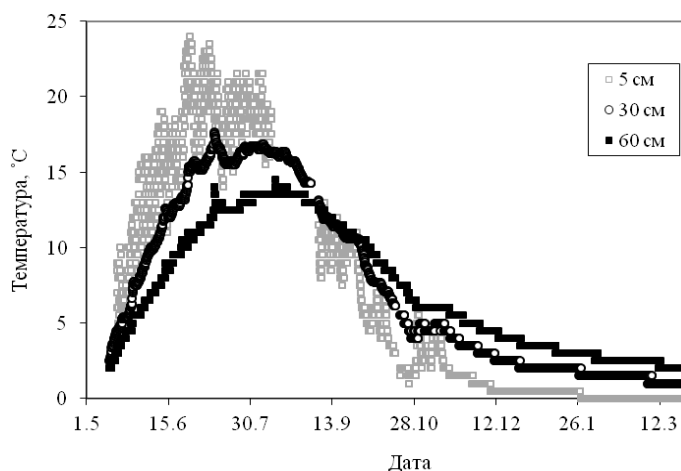


Рис. 4. Годовая динамика температуры торфяной залежи на глубинах 5, 30 и 60 см по результатам измерений в 2012–2013 гг.

Fig. 4. The annual dynamics of the peat temperature at a depth of 5, 30 and 60 cm according to the results of measurements in 2012–2013.

фяного горизонта, температурные изменения в котором наиболее оптимально объясняют сезонные УП метана, использовали регрессионное моделирование УП метана в зависимости от температур в различных слоях торфа. Поиск наилучшей регрессионной модели выполняли оценкой значимости эмпирических коэффициентов линейной регрессии и свободных членов, адекватность полученных моделей проверяли через процедуру всестороннего анализа разностей между опытными и предсказанными по модели значениями зависимой переменной. Сравнением абсолютной величины ошибки со средним значением зависимой переменной оценивали ошибку регрессионной модели в процентах. В анализе значения $p < 0,05$ для коэффициентов и критериев считались статистически значимыми. В таблицах и тексте приведены средние и стандартные ошибки средних двух и более измерений. Статистический анализ выполнен в программе Statistica 6.0 (StatSoft inc., США).

Результаты исследования

Характеристика основных факторов среды в период измерений. Результаты измерений основных климатических характеристик и факторов окружающей среды, оказывающих влияние на эмиссию метана, за весь период наблюдений по сезонам приведены в таблицах 1 – 3. Как видно из

таблиц, не отмечено заметной разницы по средним показателям температуры воздуха за год, а также в летние и зимние месяцы, что отразилось и на температурном режиме верхних горизонтов торфяной залежи. Наиболее теплыми были вегетационный сезон 2013 г. и зима 2013–2014 гг., когда за весь зимний период температура верхних слоев торфа не опускалась ниже нулевых значений. По количеству выпавших осадков самым дождливым был летний сезон 2012 г., соответственно для этого года был характерен и наиболее высокий уровень стояния болотных вод (табл. 1). Максимальное количество снега выпало зимой 2013–2014 гг. Как показали наблюдения, болотные воды на исследованном участке постоянно находятся на довольно высоком уровне, поэтому основная масса торфяной толщи круглогодично находится ниже УБВ.

Температурный режим торфяной залежи исследованного болота. Трехлетняя годовая динамика температурного режима торфяной залежи на исследованном участке приведена на рис. 3. Измерения показали, что температурный режим торфяной залежи на разных глубинах в исследованные годы имеет достаточно сходную динамику. Существенных отличий годовых температурных амплитуд не отмечено (табл. 4).

Фазы максимальных температур торфа на разных глубинах сдвинуты по временной шкале,

Таблица 1

Показатели факторов среды в вегетационные сезоны 2011–2013 гг.

Table 1

Indicators of environmental factors in the 2011–2013 growing seasons

Период	Осадки за май-октябрь, мм	ΔУБВ*, см	воздуха**	Средняя температура, май-октябрь, °С						
				торфяной залежи на разных глубинах						
				1 см	5 см	10 см	20 см	30 см	40 см	60 см
2011	322	-23,8	13,8	Непрерывную регистрацию температур в 2011 г. не проводили						
2012	594	-13,1	13,6	13,5	13,1	13,3	13,9	13,0	12,9	11,8
2013	275	-17,6	14,1	15,8	15,1	14,4	15,0	13,7	13,0	11,5

Примечание: * – максимальное снижение за сезон уровня болотных вод (УБВ), ** – температура атмосферного воздуха измерена на уровне 1 м от мохового покрова датчиком в солнцезащитном боксе.

Note: * – the maximum decrease in the bogs water level (УБВ), ** – the ambient air temperature is measured at 1 m from the moss cover using a sensor in the sun block.

Таблица 2

Показатели факторов среды в зимние сезоны 2011–2014 гг.

Table 2

Indicators of environmental factors in the winter seasons 2011–2014

Период	Осадки за ноябрь-апрель, мм	Максимальная высота снежного покрова, см	воздуха	Средняя температура, ноябрь-апрель, °С						
				торфяной залежи на разных глубинах						
				1 см	5 см	10 см	20 см	30 см	40 см	60 см
2011–2012	239	74	-7,1	-0,41	-0,07	0,02	0,39	0,50	1,31	1,89
2012–2013	226	84	-9,3	-0,32	-0,21	-0,03	1,01	1,37	1,89	2,62
2013–2014	299	68	-6,1	0,14	0,23	0,52	0,95	1,65	1,98	2,87

Таблица 3

Среднегодовые показатели температуры воздуха и торфяной залежи за 2011–2014 гг.

Table 3

The average annual temperature of air and peat deposits in 2011–2014

Период	Температура воздуха среднегодовая*, °С	Среднегодовая температура торфяной залежи на разных глубинах, °С							
		1 см	5 см	10 см	20 см	30 см	40 см	60 см	
		Непрерывную регистрацию температуры летом 2011 г. не проводили							
2011–2012	2,5	6,0	5,9	5,7	6,5	6,2	6,6		6,4
2012–2013	1,2	7,5	7,2	7,1	7,5	7,3	7,2		7,0
2013–2014	2,9								

Примечание: * – за годичный период условно принят интервал времени с 1 мая текущего года до 30 апреля следующего года.

Note: * – for a one-year period, the time interval is conditionally accepted from May 1 of the current year to April 30 of the following year.

что можно продемонстрировать на примере измерений в 2012–2013 гг. (рис. 4). Температура торфа на глубине 5 см устанавливается на максимальной отметке в начале июля месяца, оставаясь на этом уровне до начала августа. На глубине 60 см максимальных значений температура достигает только в первых числах августа и остается в этом диапазоне до начала календарной осени. Благодаря такой инертности, поддерживаемая положительными температурами эмиссия метана сохраняется на относительно высоком уровне до глубокой зимы. Осенью до формирования устойчивого снежного покрова температура верхних слоев торфяной залежи быстро снижалась. После его установления скорость снижения температуры резко падала, но положительные температуры сохранялись вплоть до схода снега с участка.

В летние месяцы даже при значительной суточной амплитуде температуры атмосферного воздуха (около 18°C) температурные колебания в торфяной залежи отмечены только в поверхностном 10-сантиметровом аэробном слое. Глубже 20 см суточные колебания температуры уже не наблюдаются. В качестве примера на рис. 5 показан суточный ход температуры торфа на поверхности и разных глубинах в один из июльских дней.

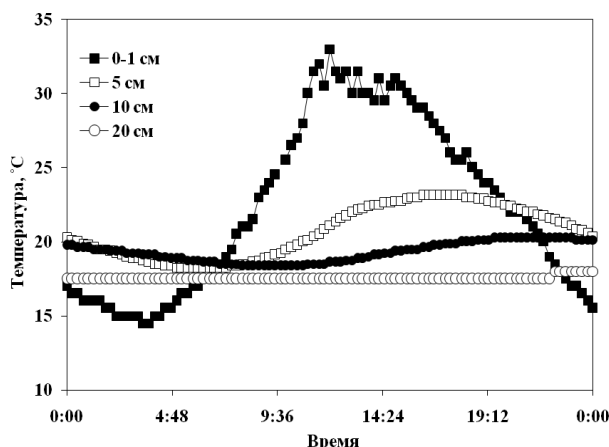


Рис. 5. Пример суточной динамики температуры в 0-, 5-, 10- и 20-сантиметровой слоях торфа по результатам измерений 03.07.2013.

Fig. 5. An example of daily dynamics of temperature in 0, 5, 10 and 20 cm peat layers according to the results of measurements 03.07.2013.

Годовые потоки метана и сезонная динамика УБВ. За период исследований графики УП метана и УБВ представляли собой одновышинные кривые (рис. 6 А, Б). В табл. 5 приведены результаты круглогодичных измерений УП метана в течение трех лет на исследованном участке болота (с начала бесснежного весеннего периода 2011 г. и до схода снега весной 2014 г.). Здесь же приведены результаты сезонных модельных величин УП метана, рассчитанных с использованием температурных зависимостей (рис. 7) и годовых температур в 30-сантиметровом слое торфа. Расчетные значения до-

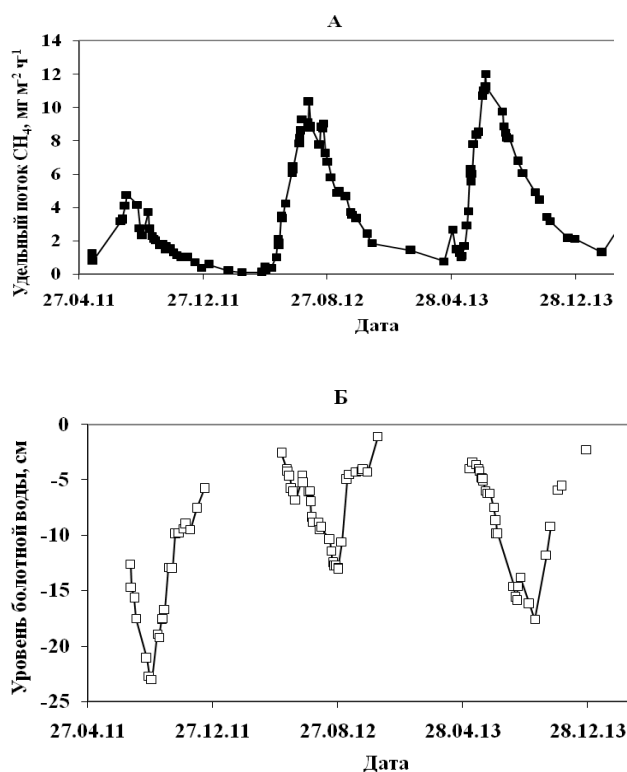


Рис. 6. Динамика УП метана (А) и УБВ (Б) на исследованном участке переходного болота по результатам измерений в 2011–2014 гг.

Fig. 6. Dynamics of methane (А) and bogs water level (УБВ) (Б) in the investigated transitional swamp according to measurement results in 2011–2014.

Таблица 4

Амплитуда температур в слоях торфяной залежи за 2011–2014 гг.

Table 4

Amplitude of temperatures in peat layers in 2011–2014

Период	Амплитуда температур торфяной залежи на разных глубинах, °С						
	0 см	5 см	10 см	20 см	30 см	40 см	60 см
2011	Непрерывная регистрация температур в этот год не производилась						
01.05.2012–01.03.2013	38,5	24,0	21,3	19,0	18,0	17,8	15,0
01.05.2013–01.05.2014	33,5	24,0	20,5	20,0	18,6	17,5	16,0

вольно близки к экспериментальным показателям. В разные годы УП метана в вегетационный период находились в диапазоне от 14,4 до 30,5 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$, в зимний сезон – от 1,4 до 6,4 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$. Максимальные сезонные УП метана, как и среднесуточные температуры, наблюдали в вегетационном сезоне 2013 г. Доля эмиссий метана зимой в разные годы составляла от 8,8 до 19,3% от годовых потоков.

Во все годы наблюдений максимальные УП метана отмечали в начале июля и до окончания первой декады августа, когда температуры исследованных торфяных слоев устанавливались на максимальных значениях (рис. 3). При этом УБВ мини-

Таблица 5

**Сравнительные УП метана ($\text{г CH}_4 \text{ м}^{-2}$ за сезон) по экспериментальным данным (УП_г – за год, УП_в – за вегетационный сезон, УП_з – зимний сезон) и по температурным моделям (УП_{гм} – за год, УП_{вм} – за вегетационный сезон, УП_{зм} – зимний сезон).
Доля зимней эмиссии метана от годовой, %**

Table 5

**Comparative methane fluxes (УП) ($\text{г CH}_4 \text{ м}^{-2}$ per season) according to experimental data (УП_г – for a year, УП_в – for the vegetation season, УП_з – winter season) and temperature models (УП_{гм} – for a year, УП_{вм} – for the vegetation season, УП_{зм} – winter season).
The share of winter methane emissions from annual, %**

Период	УП метана, $\text{г CH}_4 \text{ м}^{-2}$ за сезон						Доля зимней эмиссии метана, %	
	УП _в	УП _з	УП _г	УП _{вм}	УП _{зм}	УП _{гм}	УП _з /(УП _з +УП _в)	УП _{зм} /(УП _{зм} +УП _{вм})
2011-2012	14,4±2,9*	1,4±0,3	15,8±3,2	-	4,3±1,0**	-	8,8	-
2012-2013	23,6±1,1	5,7±2,9	29,3±4,0	24,9±1,2	7,0±0,5	31,9±1,7	19,3	22,0
2013-2014	30,5±4,5	6,4±2,2	36,9±6,7	30,1±3,5	8,0±1,0	38,1±4,5	17,3	21,0

Примечание: * – среднее значение ± стандартная ошибка для экспериментальных данных, прочерк – отсутствие данных, ** – расчетная величина по модели ± ошибка модели.

Note: * – mean ± standard error for experimental data, – dashed - absence of data, ** – calculated value by model ± model error.

мальных значений достигал обычно к третьей декаде августа (2012 г.) или к середине сентября (2013 г.) (рис. 6, Б). За сезоны наблюдений в 2012 и в 2013 гг. корреляции УП метана с УБВ составили: -0,62 ($p < 0,000$, $n=28$) и -0,51 ($p < 0,000$, $n=29$) соответственно. В августе месяце на нисходящих трендах УП метана и УБВ (рис. 6) отмечена высокая корреляция УП метана с УБВ: 0,63 ($p < 0,000$, $n=10$) в 2012 г. и 0,90 ($p < 0,000$, $n=9$) в 2013 г. Таким образом, лишь в коротком временном отрезке 2013 г. УБВ представлял существенный предиктор удельного потока метана.

Температурная зависимость эмиссии метана. Анализ экспериментальных данных показал, что наиболее важным фактором, влияющим на эмиссию CH_4 на исследованном пойменном болоте, является температура торфа на разных глубинах. Годовой температурный режим торфяной залежи в слоях, расположенных ниже уровня стояния болотной воды (20 см и глубже), характеризуется сходными показателями (табл. 3). Следовательно, в данных горизонтах существуют одинаковые условия для метаногенной деятельности микроорганизмов. При этом за все три года наблюдений максимально высокая корреляция между эмиссией CH_4 и температурой торфа отмечена для 30-сантиметрового слоя (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции между эмиссией метана и температурой торфяной залежи на разных глубинах, см

Table 6

Correlation coefficients between methane emission and peat temperature at different depths, cm

Период	Коэффициент корреляции эмиссии CH_4 с температурой торфа на разных глубинах						
	0	5	10	20	30	40	60
2011-2012	0,85	Нет данных	0,71	0,80	0,89	0,81	Нет данных
2012-2013	0,37	0,52	0,59	0,85	0,96	0,96	0,86
2013-2014	0,29	0,63	0,74	0,86	0,91	0,86	0,76

В сезонной шкале времени при достаточной, как в нашем случае, частоте наблюдений на глубине 30 см отмечена экспоненциальная связь УП метана с температурным фактором. Экспоненциальная связь эмиссии метана с температурным фактором $\text{CH}_4 = 0,744 \exp(0,137T)$ показана, например, в работе М.В. Глаголева и А.В. Смагина [8].

По результатам первого года исследований модель, описывающая УП метана в зависимости от температуры торфа, имела вид $\text{УП}_{\text{CH}_4} = 0,726 \exp(0,106T)$ (рис. 7А) с показателями $R=0,94$, $F=160$, $p < 0,000$, $n=22$, ошибка уравнения в процентном выражении составляет 22,9. Эта модель объясняла 89% ($R^2=0,89$) вариации сезонных УП метана. По результатам сезонных исследований в 2012–2013 гг. модель имела вид $\text{УП}_{\text{CH}_4} = 1,418 \exp(0,114T)$ (рис. 7Б). Она объясняла 96% ($R^2=0,96$) вариаций УП метана от температуры в 30-сантиметровом горизонте ($R=0,98$, $F=675$, $p < 0,000$, $n=28$, ошибка модели 4,7%). Для третьего года исследований связь УП метана с температурой имела вид $\text{УП}_{\text{CH}_4} = 1,813 \exp(0,111T)$ (рис. 7 В), $R=0,96$, $F=253$, $p < 0,000$, $n=25$, ошибка модели 11,5%.

Результаты измерений УП метана в начале зимнего периода хорошо вписываются в соответствующие температурные модели (светлые маркеры на рис. 7). Но по мере промерзания верхних горизонтов торфяной залежи реально измеренные результаты эмиссий УП метана существенно ниже модельных величин. Например, снижение температуры торфа зимой 2011–2012 гг. произошло существенно быстрее относительно других периодов наблюдений и это отразилось отклонением измеренных величин от модельных значений графика в самом начале зимы (рис. 7А), тогда как в другие годы такой эффект наблюдался только в конце зимы или весной (рис. 7 Б, В).

Динамика метана в болотной воде. В годичном цикле концентрация метана в болотной воде к концу зимы достигала максимального значения и снижалась до минимума к концу лета (рис. 8). В начале весны на участке содержание метана в воде повышалось в среднем до $0,41 \pm 0,06 \text{ мг л}^{-1}$ ($n=8$). После схода снега и оттаивания сезонно мерз-

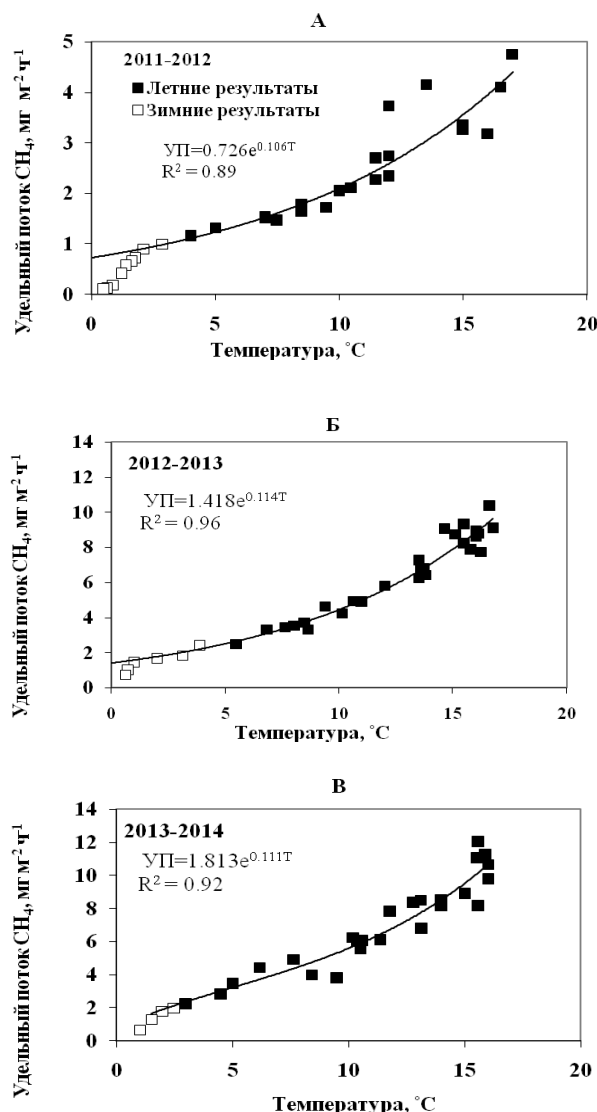


Рис. 7. Зависимости УП метана от температуры торфа на глубине 30 см по результатам летне-зимних исследований в 2011 (А), 2012 (Б), 2013 (В) гг. Каждая точка на графике представляет среднее значение из двух измерений. Темными маркерами обозначены удельные потоки CH_4 за вегетационный период, светлыми – в зимний период.
Fig. 7. Dependence of methane fluxes (УП) on peat temperature at a depth of 30 cm according to the results of summer-winter research in 2011 (A), 2012 (B), 2013 (B). Each point on the graph represents the average of two dimensions. Dark markers indicate the specific fluxes of CH_4 during the vegetative period, and light ones – in winter.

лого слоя содержание CH_4 в болотной воде довольно быстро понизилось до значений $0,20 \pm 0,04$ $mg\ l^{-1}$ и оставалось на этом уровне до начала зимы (рис. 8). Повышение концентрации метана зарегистрировано в конце вегетационного периода задолго до образования сезонно мерзлого слоя на поверхности болота. Подобная закономерность распределения метана в болотной воде в разные сезоны года рассмотрена в ряде работ [6, 17]. Например,

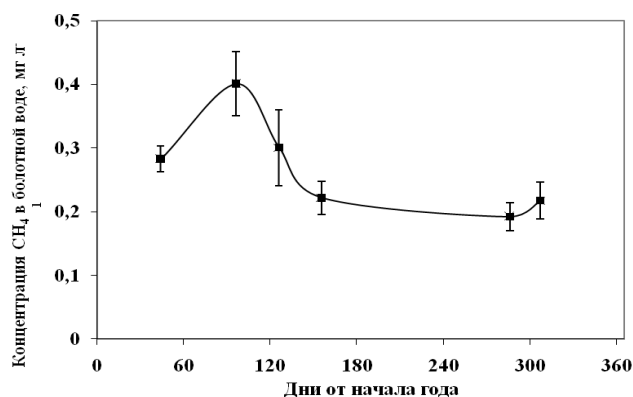


Рис. 8. Годовая динамика концентрации метана в болотной воде на исследованном участке в 2012–2013 гг.
Fig. 8. Annual dynamics of methane concentration in bogs water in the investigated site in 2012–2013.

рост концентрации метана в зимнее время авторы [17] объясняют опосредованным влиянием растений на транспорт CH_4 , изменением гидростатического давления, а также влиянием температуры на растворимость метана.

Динамика метана под сезонно мерзлым слоем болота. Сразу после удаления замерзшего слоя УП метана составлял $10,0 \pm 2,1$ $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ ($n=4$). Спустя трое суток эмиссия снизилась примерно в два раза, равновесная эмиссия установилась на 10-е сутки (рис. 9). Простое интегрирование кривой дает величину УП метана за 10-суточный период около $1,2$ $g\ m^{-2}$. Выполненный по температурной модели (рис. 7 Б) расчет УП метана за период от начала замерзания верхнего слоя и до выполнения измерений составил чуть большую величину $1,4$ $g\ m^{-2}$.

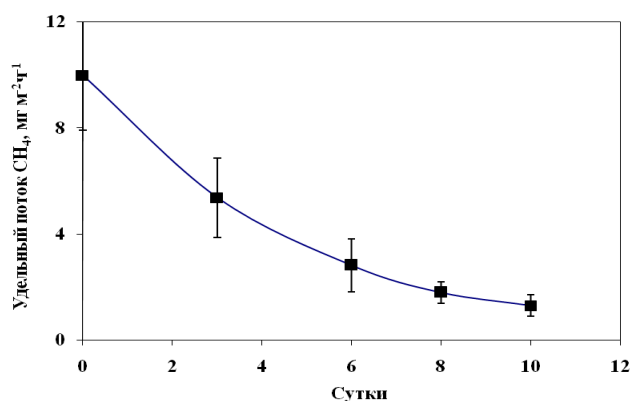


Рис. 9. Динамика УП метана из-под сезонно мерзлого слоя болота после его удаления. По оси – сутки после удаления сезонно мерзлого слоя болота, по оси ординат – удельный поток метана, $mg\ CH_4\ m^{-2}\ h^{-1}$ ($n=4$).
Fig. 9. Dynamics of methane fluxes (УП) from under the seasonally frozen layer of the swamp after its removal. On the axis – the day after the removal of the seasonally frozen layer of the bog, along the ordinate axis – specific flow of methane, $mg\ CH_4\ m^{-2}\ h^{-1}$ ($n=4$).

Обсуждение результатов

Трехгодичные измерения на участке показали заметную разницу УП метана за период исследований (табл. 5). Весной 2011 г. в пойме р. Сысолы не было разлива, а в летние месяцы наблюдали низкое количество осадков, поэтому в вегетационном сезоне этого года отмечали самый низкий за все время наблюдений УБВ (табл. 1, рис. 6Б), и как следствие – низкий годовой УП метана. Максимальное снижение УБВ достигало 23,8 см, тем самым существенно увеличивая аэробный слой для потенциального окисления метана. Уже в начале лета 2011 г. на болоте наблюдали явную депрессию осок и пушицы (побурение, почернение, высыхание большей части побегов), что отразилось на их функциональной деятельности и соответственно на производстве ингредиентов для метаногенеза [18]. Считаем, что угнетение развития травянистых растений, наряду с увеличением аэробного слоя на данном участке, были в числе основных причин почти двукратного снижения сезонной эмиссии метана относительно последующих благополучных в этом плане лет. В последующие годы наблюдали увеличение эмиссии метана, чему способствовал относительно высокий УБВ (табл. 1, рис. 6Б), который за сезон не снижался более чем на 17,6 см, т.е. активный метаногенный слой все время находился ниже уровня болотных вод. Известно, что интенсивный метаногенез в болотных комплексах происходит, начиная с глубин 18–28 см под УБВ [10].

Максимальную летнюю эмиссию метана $30,5 \text{ г м}^{-2}$ наблюдали в наиболее теплый сезон 2013 г. К этому периоду осоки и пушицы окончательно восстановились после депрессивного в гидрологическом отношении лета 2011 г. В зимнем сезоне 2013–2014 гг. также отмечали максимальные величины УП метана. Доля зимней эмиссии на данном участке в разные годы составляла 8,8–19,3% и была максимальной в 2012 г. (табл. 5). Ближе к окончанию календарной зимы, по мере завершения промерзания верхнего слоя болота, эмиссия метана снижалась быстрее, чем можно было бы прогнозировать по температурным условиям торфа (рис. 7). На участке в морозные и малоснежные зимы замерзший верхний слой торфа к концу марта месяца может достигать 10–15 см. Он начинает препятствовать диффузии метана, проходы для которого остаются только через трещины и торчащие в замерзшем слое болота остатки прошлогодних побегов растений. Степень и глубина промерзания участка зависят от суровости зимы, высоты снежного покрова. Известно, что запасы CH_4 в болотной воде в определенной точке торфяника контролируются разницей между скоростью добавления CH_4 к этой точке с помощью производства и переноса, а также скоростью потери CH_4 посредством окисления, перемещения или эмиссии [19]. Когда скорость локального продуцирования газа выше, чем его отток и распределение в болотной воде, то образуются скопления газа внутри торфяной залежи [8]. Рядом авторов было показано, что к весне на водно-болотных участках наблюдаются высокие уров-

ни концентрации CH_4 между слоями льда [20]. При определенных условиях метан накапливается или подо льдом, или между слоями льда, но рано или поздно накопившийся метан высвобождается. Как только снежный покров начнет таять, газ, пойманный в ловушку под слоями льда или между ними, в конечном итоге будет выпущен [17]. Некоторые исследователи зимние потоки метана объясняют потерей «летнего» CH_4 из торфа через трещины в замороженных поверхностных слоях [21] или предполагают, что зимняя эмиссия является «инерцией» летней эмиссии [22]. По результатам наших измерений, мы не можем опровергнуть или принять предположение о зимней эмиссии из «летнего» метана, но с высокой определенностью можем сказать об образовании метана в результате текущей деятельности микроорганизмов. Поэтому мы склоняемся к утверждениям, что зимняя эмиссия CH_4 отражает темпы его продуцирования зимой в слоях торфа с положительными температурами [23], и что зимнее продуцирование CH_4 может в основном питаться субстратами, полученными из растительной биомассы предыдущего вегетационного периода [24]. На исследованном пойменном болоте весной также наблюдается выделение накопленного подо льдом метана с приличной начальной скоростью $10,0 \pm 2,1$ ($n=4$) $\text{мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ и лишь спустя несколько суток эмиссия метана устанавливается примерно на уровне, соответствующей температурной зависимости (рис. 7). Как показали расчеты, за этот период выделяется примерно столько метана, сколько бы выделилось с момента промерзания болота согласно температурной модели. Накопление CH_4 в болотной воде к концу зимы (рис. 8) также свидетельствует о функционировании в этот период метаногенных микроорганизмов. Таким образом, накопление метана под замерзшим слоем болота и интенсивные весенние выбросы показывают, что метаногенез зимой на данном болоте не прекращается и происходит довольно активно.

В межгодовом временном масштабе зимние потоки метана хорошо согласуются с потоками в вегетационном сезоне. Из табл. 5 видно, что зимняя эмиссия CH_4 положительно коррелирует с эмиссией метана в вегетационном периоде и может составлять до 20 % от годового УП, что является достаточно высоким показателем. Но мы полагаем, что реальные эмиссии должны быть ближе к модельным величинам (табл. 5), поскольку произведенный метан накапливался под мерзлым слоем болота или пространственно распределялся в болотной воде по градиенту концентраций. Следовательно, рано или поздно он должен будет выделяться в атмосферу. Измеренная камерным методом зимняя эмиссия 2011–2012 гг. имеет самую низкую величину $1,4 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$ и ее доля в годовом балансе метана не превышает 8,8%, тогда как по температурной зависимости зимний УП метана должен быть $4,3 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$ (табл. 5). По этой же причине 19,3 % зимней эмиссии от годовой – это скорее всего не максимальная величина для данного типа болота. В наших измерениях не учтена часть образованной, но не зарегистрированной камерным

методом зимней эмиссии, обусловленной промерзанием болота. Считаем, что модельные величины зимних эмиссий порядка 21–22% от годовых более соответствуют реальным потокам. На основании полученных сведений при расчетах зимних удельных потоков метана более адекватным будет использование температурных моделей, построенных по результатам сезонных наблюдений.

Численные значения УП метана для исследованного болота укладываются в диапазон показателей, полученных рядом исследователей, занимавшихся измерениями сезонных и годовых потоков метана болот бореальной зоны. Для болот Финляндии потоки метана с мая по сентябрь для олиготрофных болот составили $8,0 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$, для минеротрофных болот – $19,0 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$ [25]. Доля зимней эмиссии для болот восточной Финляндии, находящихся примерно на широте наших исследований, составляет 22% от годовой [27]. Полученные нами результаты практически совпадают с этими данными, если учесть более продолжительные вегетационные периоды в наших исследованиях.

Заключение

Для исследованного болота удалось получить простейшую модель, базирующуюся на предикторе температуры в 30-сантиметровом торфяном горизонте, круглогодичное измерение которого не представляет особой сложности. На ее базе возможно с достаточной степенью точности моделировать эмиссию не только в вегетационном сезоне, но и годовом цикле. В межгодовых интервалах времени на эмиссию метана может оказывать влияние УБВ при критических его уровнях для данного болота и модель в этом случае должна учитывать влияние данного фактора на УП метана. Между тем, такие состояния для экспериментального болота бывают весьма редки, по крайней мере, гидрологическая ситуация 2011 г. была отмечена впервые за 10 лет наблюдений за уровнем стояния болотных вод.

Трехлетние наблюдения на переходном болоте в средней тайге Республики Коми показали, что потоки метана за период исследований находились в диапазоне: годовые – $15,8 - 36,9 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$, за вегетационный период – $14,4 - 30,5 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$, за зимний период – $1,4 - 6,4 \text{ г CH}_4 \text{ м}^{-2}$. Полученные результаты могут быть использованы для внесения корректировки в оценку потоков парниковых газов для северных болот европейской России в условиях климатических изменений [27].

Авторы признательны за подготовку карты района исследований Л.Н. Рыбину, а определение сфагновых мхов – Т.П. Шубиной.

Исследования выполнены при поддержке Программы УрО РАН, проекта №18-4-4-5 «Эмиссионная составляющая углеродного цикла пойменных болот среднетаежной подзоны в условиях климатических изменений».

Литература

1. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L. et al. Carbon and Other Biogeochemical Cycles // Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 570 p.
2. Леса Республики Коми / Г.М. Козубов, А.И. Таскаев, С.В. Дегтева, В.А. Мартыненко, И.В. Забоева, К.С. Бобкова, Э.П. Галенко / Отв. ред. Г.М. Козубов, А.И. Таскаев. М., 1999. 332 с.
3. Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми / Отв. ред. К.С. Бобкова, С.В. Загирова. Сыктывкар: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2014. 202 с.
4. Мигловец М.Н., Загирова С.В., Михайлов О.А. Эмиссия метана в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 93–98.
5. Ecosystem of a mesooligotrophic peatland in northwestern Russia: development, structure and function/ Ed. S. Zagirova, J. Shneider. Syktivkar: IB Komi SC UB RAS, 2016. 172 p.
6. Сирин А.А., Нильсон М., Шумов Д.Б. и др. Сезонные изменения растворенного метана в вертикальном профиле болот Западнодвинской низины // Доклады Академии наук. 1998. Т. 361. № 2. С. 280–283.
7. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири/Н.С.Паников, А.А.Титлянова, М.В.Палеева, А.М.Семенов, Н.П.Миронычева-Токарева, В.И.Макаров, Е.В.Дубинин, С.П.Ефремов //Доклады АН СССР. 1993. Т. 330. №3. С. 388–390.
8. Глаголев М.В., Смагин А.В. Количественная оценка эмиссии метана болотами – от почвенного профиля – до региона// Доклады по экологическому почвоведению. 2006. Вып.3. №3. С. 75–114.
9. Release of CO_2 and CH_4 from small wetland lakes in western Siberia/ M.E.Repo, J.T.Huttunen, A.V.Naumov, A.V.Chichulin, E.D.Lapshina, W.Bleuten, P.J.Martikainen// Tellus. 2007. Vol. 59. P. 788–796.
10. Глаголев М.В. Эмиссия метана: идеология и методология «стандартной модели» для Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1. Новосибирск: НГУ, 2008. С. 176–190.
11. Глаголев М.В., Суворов Г.Г. Болота в проблеме метана как парникового газа: что сделано и что предстоит сделать? // Доклады по экологическому почвоведению. 2008. Вып.2. №8. С. 19–43.

12. Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры Западной Сибири / М.В.Глаголев, И.Е.Клепцова, В.С.Казанцев, И.В.Филиппов, Ш.Ш.Максютов // Вестник ТГПУ. 2010. Вып. 3 (93). С. 78–86.
13. Удельные потоки метана из экосистем южной тундры Западной Сибири / Л.А.Кривенюк, М.В.Глаголев, И.А.Фастовец, Б.А.Смоленцев, Ш.Ш.Максютов // ДОСигИК. 2014. Т. 5. № 1(9). С. 26–42.
14. Crill P.M. Seasonal patterns of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil // Global Biogeochem. Cycles. 1991. 5(4). P. 319–334.
15. Oechel W.C., Vourlitis G. L. The effects of climate change on Arctic tundra ecosystems // Trends Ecol. and Evol. 1994. Vol. 9. P. 324–329.
16. Crill P.M., Bartlett K. B., Harriss R. C., Gorham E. et al. Methane flux from Minnesota peatlands. Global Biogeochemical Cycles. 1988. Vol. 2(4). P. 371–384.
17. Melloh R.A., Crill P.M. Winter methane dynamics in a temperate peatland Global Biogeochem Cycles, 1996. Vol.10. P. 247–254.
18. Strack M., Mwakanyamale K., Fard H.G. et al. Effect of plant functional type on methane dynamics in a restored minerotrophic peatland // Plant and soil. 2017. Vol. 410 (1-2). P. 231–246.
19. Strack M., Waddington J. M. Spatiotemporal variability in peatland subsurface methane dynamics // J. of Geophysical Research: Biogeosciences. 2008. 113 (G2).
20. Mast M.A., Wickland K.P., Striegl R.T., Clow D.W. Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado // Global Biogeochemical Cycles. 1998.12(4). P. 607–620.
21. Clymo R.S. The limits to peat bog growth // Phil. Trans. R. Soc. Ser. 1984. Vol. 303. P. 605–654.
22. Zhu D., Chen H.A., Wang Wu. N., Luo Y.F. Winter Methane Emission from an Alpine Open Fen on Tibetan Plateau. Pol. J. Ecol. 2011. Vol. 59. №1. P. 87–94.
23. Williams R.T., Crawford R. L. Methane Production in Minnesota Peatlands // Appl Environ Microbiol. 1984. Vol. 47(6). P.1266–1271.
24. The role of Sphagnum mosses in the methane cycling of a boreal mire / T.Larmola, E.S.Tuittila, M.Tirola, H.Nykänen, P.J.Martikainen, et al. Ecology. 2010. Vol. 91 (8). P. 2356–2365.
25. Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates/ H.Nykanen, J.Alm, J.Silvola, K. Tolonen and P.J.Martikainen // Global Biogeochem. Cycles. 1998. Vol. 12 (1). P. 53– 69.
26. Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands/ J.Alm, S.Saarnio, H.Nykanen, J.Silvola, P.J. Martikainen // Biogeochemistry. 1999. Vol.44. P. 163–186.
27. Sirin A., Laine J., Parish F., Charman D. et al. Peatlands and greenhouse gases // Assessment on peatlands, biodiversity and climate change, main report / Kuala Lumpur, Wageningen: Global Environment Centre, Wetlands International, 2008. P. 118–138.

References

1. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L. et al. Carbon and Other Biogeochemical Cycles // Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 570 p.
2. Lesa Respubliki Komi [Forests of the Komi Republic] / G.M. Kozubov, A.I. Taskaev, S.V. Degteva, V.A. Martynenko, I.V. Zaboeva, K.S. Bobkova, E.P. Galenko/ Eds. G.M. Kozubov, A.I. Taskaev. Moscow, 1999. 332 p.
3. Uglerod v lesnyx i bolotnyx ekosistemax osobo ohranyaemyx prirodnyx territorii Respubliki Komi [Carbon in forest and bog ecosystems of specially protected natural areas of the Komi Republic] / Eds. K.S.Bobkova, S.V.Zagirova. Syktyvkar: Inst. of Biology, Komi Sci.Centre, Ural Br., RAS, 2014. 202 p.
4. Miglovets M.N., Zagirova S.V., Mikhailov O.A. Emissiya metana v rastitelnyx soobshhestvax mezo-oligotrofnogo bolota srednej tajgi [Emission of methane in plant communities of the meso-oligotrophic bog of the middle taiga] // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and applied ecology]. 2014. № 1. P. 93–98.
5. Ecosystem of a mesooligotrophic peatland in northwestern Russia: development, structure and function/ Eds. S. Zagirova, J. Shneider. Syktyvkar: Inst. of Biology, Komi Sci.Centre, Ural Br., RAS, 2016. 172 p.
6. Sirin A.A., Nilson M., Shumov D.B. et al. Sezonnie izmeneniya rastvorennogo metana v vertikalnom profile bolot Zapadnodvinskoi niziny [Seasonal changes of dissolved methane in the vertical profile of the marshes of the West-Dvina Basin] // Reports of the Academy of Sciences. 1998. Vol. 361. No. 2. P. 280–283.
7. Emissiya metana iz bolot yuga Zapadnoj Sibiri [Emission of methane from the marshes of the south of Western Siberia] / N.S. Panikov, A.A. Titlyanova, M.V. Paleeva, A.M. Semenov, N.P. Mironycheva-Tokareva, V.I. Makarov, E.V. Dubinin, S.P. Efremov // Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1993. Vol. 330. №3. P. 388–390.
8. Glagolev M.V., Smagin A.V. Kolichestvennaya ocenka emissii metana bolotami – ot pochvennogo profilya – do regiona [Quantitative estimation of methane emission from bogs - from the soil profile - to the region] // Doklady po

- ekologicheskomu pochvovedeniyu [Reports on ecological soil science]. 2006. Issue 3. №3. P. 75–114.
9. *Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western Siberia*/M.E. Repo, J.T. Huttunen, A.V. Naumov, A.V. Chichulin, E.D. Lapshina, W. Bleuten, P.J. Martikainen // *Tellus*. 2007. Vol. 59. P. 788–796.
10. *Glagolev M.V. Emissiya metana: ideologiya i metodologiya «standartnoj modeli» dlya Zapadnoj Sibiri* [Methane emission: the ideology and methodology of the "standard model" for Western Siberia] // *Dinamika okruzhayushhej sredy i globalnye izmeneniya klimata* [Dynamics of the environment and global climate change]: Collection of proc. of the UNESCO Chair of the Ugra State Univ.]. Issue 1. Novosibirsk: Novosibirsk State Univ., 2008. P. 176–190.
11. *Glagolev M.V., Suvorov G.G. Bolota v probleme metana kak parnikovogo gaza: chto sdelayano i chto predstoit sdelayat?* [Bogs in the problem of methane as a greenhouse gas: what has been done and what is to be done?] // *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu* [Reports on environmental pedology]. 2008. Issue 2. №8. P. 19–43.
12. *Emissiya metana iz bolotnyx landshaftov tundry Zapadnoj Sibiri* [Emission of methane from the marsh landscapes of the tundra of Western Siberia] / M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, V.C. Kazantsev, I.V. Filippov, Sh.Sh. Maksyutov // *Bull. of Tomsk State Pedagog. Univ.*. 2010. Issue 3 (93). P. 78–86.
13. *Udelnye potoki metana iz ekosistem yuzhnoj tundry Zapadnoj Sibiri* [Specific flows of methane from the ecosystems of the southern tundra of Western Siberia] / L.A. Krivenok, M.V. Glagolev, I.A. Fastovets, B.A. Smolentsev, Sh.Sh. Maksyutov // *DOSiGIK*. 2014. Vol. 5. № 1 (9). P. 26–42.
14. *Crill P.M. Seasonal patterns of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil* // *Global Biogeochem. Cycles*. 1991. 5(4). P. 319–334.
15. *Oechel W.C., Vourlitis G. L. The effects of climate change on Arctic tundra ecosystems* // *Trends Ecol. and Evol.* 1994. Vol. 9. P. 324–329.
16. *Crill P.M., Bartlett K. B., Harriss R. C., Gorham E. et al. Methane flux from Minnesota peatlands*. *Global Biogeochem. Cycles*. 1988. Vol. 2(4). P. 371–384.
17. *Melloh R.A., Crill P.M. Winter methane dynamics in a temperate peatland*. *Global Biogeochem Cycles*, 1996. Vol.10. P. 247–254.
18. *Strack M., Mwakanyamale K., Fard H.G. Effect of plant functional type on methane dynamics in a restored minerotrophic peatland* // *Plant and soil*. 2017. Vol. 410 (1-2). P. 231–246.
19. *Strack M., Waddington J. M. Spatiotemporal variability in peatland subsurface methane dynamics* // *J. of Geophys. Res.: Biogeosciences*. 2008. 113 (G2).
20. *Mast M.A., Wickland K.P., Striegl R.T., Clow D.W. Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado* // *Global Biogeochem. Cycles*. 1998. 12(4). P. 607–620.
21. *Clymo R.S. The limits to peat bog growth*. *Phil. Trans. R. Soc. Ser. Lond.*, 1984. Vol. 303. P. 605–654.
22. *Zhu D., Chen H.A., Wang Wu. N., Luo Y.F. Winter Methane Emission from an Alpine Open Fen on Tibetan Plateau* // *Pol. J. Ecol*. 2011. Vol. 59. No.1. P. 87–94.
23. *Williams R.T., Crawford R. L. Methane Production in Minnesota Peatlands* // *Appl Environ Microbiol*. 1984. Vol. 47(6). P. 1266–1271.
24. *The role of Sphagnum mosses in the methane cycling of a boreal mire* / T.Larmola, E.Tuittila, M.Tirola, H.Nykanen, P.J.Martikainen et al. // *Ecology*. 2010. Vol. 91 (8). P. 2356–2365.
25. *Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates* / H.Nykanen, J.Alm, J.Silvola, K.Tolonen, P.J.Martikainen // *Global Biogeochem. Cycles*. 1998. Vol. 12 (1). P. 53– 69.
26. *Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands* / J.Alm, S.Saarnio, H.Nykanen, J.Silvola, P.J.Martikainen // *Biogeochemistry*. 1999. Vol.44. P. 163–186.
27. *Sirin A., Laine J., Parish F., Charman D. et al. Peatlands and greenhouse gases* // *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change, main report* / Wageningen: Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, 2008. P. 118–138.

Статья поступила в редакцию 08.06.2018.

УДК 582:547.92(597.7)

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-46-53

ЭКДИСТЕРОИДСОДЕРЖАЩИЕ РАСТЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА КУК ФЫОНГ (СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ)

В.В. ВОЛОДИН*, ВУ ТХИ ЛОАН**, С.О. ВОЛОДИНА*, А.Н. КУЗНЕЦОВ**

*Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

**Российско-Вьетнамский научно-исследовательский и технологический тропический центр, г. Ханой (Вьетнам)

volodina@ib.komisc.ru

На принципах хемосистематики проведен направленный скрининг растений Национального парка Кук Фыонг (северная часть Вьетнама) на содержание экдистероидов. Всего выявлено 23 экдистероидсодержащих вида в семействах Acanthaceae, Amaranthaceae, Anacardiaceae, Aquifoliaceae, Capparaceae, Convolvulaceae, Malvaceae, Verbenaceae, в представителях которых обнаружение экдистероидов было наиболее вероятным. Среди них имеются виды, имеющие лекарственное и пищевое значение в традиционной медицине и кухне Вьетнама. Наибольший интерес для дальнейшего исследования представляют растения родов *Vitex*, *Sida*, виды *Achyranthes bidentata* и *Cyathula prostrata*, имеющие применение в народной и научной медицине Вьетнама и других стран Юго-Восточной Азии, а также *Dracontomelon duperreanum* и *Averrhoa carambola*, плоды которых съедобны, и *Ilex purpurea*, листья которого используются для приготовления чая. В качестве сырья для фармацевтической промышленности рекомендована кора дерева *Vitex quinata*, листья и молодые побеги *Sida acuta*, *Sida rhombifolia*, *Cyathula prostrata* и *Achyranthes bidentata*.

Ключевые слова: экдистероиды, распространение, Вьетнам, Национальный парк Кук Фыонг

V.V.VOLODIN, VU THI LOAN, S.O.VOLODINA, A.N. KUZNETSOV. ECDY-STEROID-CONTAINING PLANTS OF THE NATIONAL PARK CUC PHUONG (NORTHERN VIETNAM)

On the principles of chemosystematics, screening of plants of the National Park Cuc Phuong (Northern Vietnam) for the content of ecdysteroids was carried out. A total of 23 ecdysteroid-containing species in the families of Acanthaceae, Amaranthaceae, Anacardiaceae, Aquifoliaceae, Capparaceae, Convolvulaceae, Malvaceae, Verbenaceae were identified, in which the detection of ecdysteroids was most likely. Among them there are species of medicinal and nutritional value in the traditional medicine and cuisine of Vietnam. The most interesting for further research are plants of the genera *Vitex*, *Sida*, plant species *Achyranthes bidentata* and *Cyathula prostrata*, used in folk and scientific medicine in Vietnam and other countries of Southeast Asia, as well as *Dracontomelon duperreanum* and *Averrhoa carambola*, which fruits are edible, and *Ilex purpurea*, the leaves of which are used for tea making. The bark of *Vitex quinata* tree, the leaves and young shoots of *Sida acuta*, *Sida rhombifolia*, *Cyathula prostrata* and *Achyranthes bidentata* are recommended as raw materials for the pharmaceutical industry.

Keywords: ecdysteroids, distribution, plants, Vietnam, National Park Cuc Phuong

Введение

Во Вьетнаме остро стоит проблема улучшения качества жизни людей, в частности, проблема увеличения профессионального долголетия. В этих целях все большее применение находят адаптогенные средства, содержащие фитоэкдистероиды – полигидроксильированные стерины, являющиеся рас-

тительными аналогами гормонов линьки насекомых. Будучи не токсичными для млекопитающих и человека и не оказывая на них гормонального действия, фитоэкдистероиды благоприятно влияют на углеводный, липидный и белковый обмен, повышают сопротивляемость организма к стрессу и неблагоприятным факторам среды, увеличивают силу и выносливость людей, ускоряют восстановление

после высокой физической и психической нагрузки [1]. Ранее в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН была создана линия биологически активных добавок к пище, которые содержат очищенные экдистерины, выделенные из листьев растения серпухи венценой (*Serratula coronata* L., Asteraceae); «Кардистен», рекомендованный для профилактики ишемической болезни сердца и реабилитации в послеинфарктный период, «Диастен» – для профилактики диабета II типа и «Адастен» – для повышения физической и умственной работоспособности и устойчивости к стрессу [2].

Ранее с использованием современных методов хемотаксономии и молекулярной филогенетики нами были выявлены закономерности распространения экдистеринов в царстве растений, что позволило разработать научно обоснованный прогноз обнаружения фитоэкдистеринов в географически удаленных флорах [3]. Флора Вьетнама насчитывает свыше 12 тыс. видов растений, среди которых более 2 тыс. видов являются пищевыми и лекарственными, однако систематических исследований растений флоры Вьетнама на содержание экдистеринов не проводилось. Целью настоящей работы было выявление практически важных видов экдистеринодержущих растений во флоре Северного Вьетнама в качестве ресурсных видов для нужд фармацевтической и пищевой промышленности.

Район, объекты и методы исследования

Территория Вьетнама вытянута в меридиональном направлении на расстояние, более чем на 1750 км, что обуславливает разнообразие климатических и природных условий и, как следствие, су-

щественные отличия в видовом составе флор северной, центральной и южной части Вьетнама. Ввиду значительной антропогенной трансформации природной флоры Вьетнама (в особенности на равнинных территориях Северного Вьетнама вследствие их сельскохозяйственного освоения) исследования проводились нами на территории Национального парка Кук Фыонг, расположенного в северной части страны. Национальный парк Кук Фыонг расположен на восточном крае известняковой горной цепи, берущей начало на плоскогорье Шонла Северного Вьетнама. В парке площадью 220 км² преобладают первичные тропические известняковые леса (фото 1), где встречаются 1980 видов сосудистых растений из 887 родов и 221 семейства. Ведущие семейства флоры парка – Euphorbiaceae, Poaceae, Fabaceae, Rubiaceae, Asteraceae, Moraceae, Lauraceae, Cyperaceae, Orchidaceae и Acanthaceae [4].

Объектами исследований являлись дикорастущие виды растений флоры Северного Вьетнама. Выявление мест произрастания растений проводили во время серии маршрутных экспедиций в северной части Вьетнама в октябре 2015 г. на территории Национального парка Кук Фыонг. Указывали приуроченность местообитаний растений к элементам рельефа и типам растительности, выполнены краткие геоботанические описания (фото 2).

Для анализа отбирали разные части растений на разных фазах развития. Растительный материал фиксировали путем высушивания в бумажных пакетах при температуре 60°C. **Методика ВЭЖХ-анализа растительных образцов:** измельченную растительную пробу 50–100 мг (точная



Фото 1. Панорама Национального парка Кук Фыонг. Фото В.В. Володина.
Photo 1. Panorama of the National Park Cuc Phuong. Photo by V.V.Volodin.



Фото 2. Отбор образцов растений для биохимического анализа. Наибольшее количество экидистероидов обнаружено в коре дерева *Vitex quinata*. Фото С.О.Володиной.

Photo 2. Plant sampling for biochemical analysis. The maximum content of ecdysteroids was found in the bark of *Vitex quinata* tree. Photo by S.V.Volodina.

навеска) экстрагировали 3 мл 60 %-ного метанола при 25 °C в течение 16 ч. Экстракт освобождали от взвешенных частиц путем центрифугирования (12000 об./мин, 25 мин.). Затем отбирали 1 мл экстракта и разбавляли 2 мл воды. Разбавленный экстракт (3 мл) пропускали через концентрирующий патрон Диапак C₁₆ (ЗАО "БиоХимМак", Россия). Экидистероиды смывали с патрона 60 %-ным метанолом (3 мл). Перед вторичным использованием патрон промывали чистым метанолом (5 мл), а затем стабилизировали 20 %-ным раствором метанола (3 мл). Анализ проводили независимо в двух лабораториях. В России – в лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) на аналитической системе ВЭЖХ "Varian", "Pro Star" (США). Состав элюента: вода – ацетонитрил (100:20), скорость потока элюента 1,5 мл/мин; λ = 242 нм; колонка Kromasil C₁₈ (150x4мм). Во Вьетнаме – в Институте тропической медицины Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра (г. Ханой) на аналитической системе Agilent 1200 (США). Состав элюента: вода – ацетонитрил (100:20), скорость потока элюента 1 мл/мин; λ = 242 нм; колонка XDB-C18 (5 мкм, 4,6x150 мм).

Результаты исследований

Учитывая высокий уровень биоразнообразия флоры Вьетнама, было совершенно очевидно, что

без знания закономерностей распространения экидистероидов среди сосудистых растений, их обнаружение в растениях, произрастающих на изучаемой территории, было бы маловероятным и весьма затруднительным. При изучении распространения важнейших классов биологически активных веществ среди растений успешно применяется принцип филогенетического родства. Например, было показано, что обнаружение алкалоидов наиболее вероятно в семействах Ranunculaceae и Rutaceae, оксиметилантрахинонов – в семействах Polygonaceae и Rhamnaceae, кумаринов – в семействах Apiaceae и Rutaceae. Эти же принципы лежат и в основе внутрисемейственного поиска [5]. Однако в литературе длительное время господствовала устойчивая точка зрения об отсутствии закономерностей в распространении экидистероидов в царстве растений и отсутствии филогенетических связей между видами-продуцентами экидистероидов на том лишь основании, что экидистероидсодержащие растения были обнаружены как в филогенетически близких, так и далеко отстоящих друг от друга таксонах [6]. В то же время, анализируя доступные в литературе данные о встречаемости экидистероидов в царстве растений, нами было высказано мнение, что закономерности распространения экидистероидов прослеживаются на внутрисемейственном уровне в трибах. В семействе Caryophyllaceae экидистероиды найдены в видах растений из родов *Silene* и

Lychnis – оба принадлежат трибе *Lychnideae*; в представителях триб *Alsineae* и *Diantheae* этого же семейства экдистероиды не были обнаружены. Эта закономерность оказалась характерна и в семействах *Chenopodiaceae*, *Amaranthaceae* и некоторых других. В больших семействах признак экдистероидности закреплен в подтрибах, например, в семействе *Asteraceae* – в подтрибе *Centaureinae*. Следует отметить, что это правило не носит абсолютный характер, и на таком этапе обобщения имеющихся данных отклонения от него можно объяснить следующими причинами: 1) несовершенством ранее применяемых методик анализа; 2) некоторой искусственностью таксономического ранга «триба» в существующих системах классификации; 3) возможной эволюционно обусловленной утратой способности к синтезу экдистероидов некоторыми видами из «положительных» родов и триб. В то же время принцип «положительных триб» был успешно реализован нами при скрининге растений флоры европейского Северо-Востока России [7].

В соответствии с этим прогнозом, мы обнаружили экдистероиды в трех видах рода *Strobilanthes* (*Acanthaceae*), *Achyranthes bidentata* Blume и *Cyathula prostrata* (L.) Blume (*Amaranthaceae*), *Dracontomelon duperreanum* Pierre (*Anacardiaceae*), трех видах рода *Ilex* (*Aquifoliaceae*), *Crateva nurvala* Buch.-Ham. (*Capparaceae*), *Ipomoea congesta* R.Br. (*Convolvulaceae*), двух видах рода *Sida* (*Malvaceae*), *Averrhoa carambola* L. и *Oxalis corymbosa* DC (*Oxalidaceae*), трех видах рода *Zanthoxylum* (*Rutaceae*), трех видах рода *Vitex* (*Verbenaceae*). В целом экдистероиды были обнаружены в 23 видах растений, произрастающих на территории Национального парка Кук Фьонг (таблица).

Следует отметить, что содержание экдистероидов в растениях этих видов варьирует в очень широком интервале концентраций. Среди них имеется небольшая группа растений с **высоким содержанием** 20-гидроксиэкдизона (20E) (до 2 и более процентов): это виды рода *Vitex* (*Verbenaceae*), два вида рода *Sida* (*Malvaceae*) и *Dracontomelon duperreanum*. Самое высокое содержание экдистероидов обнаружено в коре дерева *Vitex quinata* (Lour.) F.N.Williams (2,7 %). Кора этого дерева может служить сырьем для получения очищенной экдистероидной субстанции. Сырье других видов из этой группы растений может использоваться для получения галеновых препаратов (препаратов на основе суммарных экстрактов растений), поскольку выделение очищенных субстанций может оказаться экономически невыгодным.

Умеренное и низкое содержание экдистероидов (0,01–0,1 %) обнаружено в растениях *Cyathula prostrata* и *Achyranthes bidentata* (*Amaranthaceae*), двух видах рода *Ilex* (*Aquifoliaceae*), *Crateva nurvala* (*Capparaceae*), *Averrhoa carambola* и *Oxalis corymbosa* (*Oxalidaceae*), *Zanthoxylum scabrum* Guil-laum (*Rutaceae*). Сырье этих видов может быть использовано для получения галеновых и новогаленовых препаратов путем получения обогащенных по 20E экстрактов. Очень низкое содержание экди-

стероидов (менее 0,01 %) выявлено в трех видах рода *Strobilanthes* (*Acanthaceae*), в растениях *Ilex purpurea* Hassk. (*Aquifoliaceae*), *Ipomoea congesta* (*Convolvulaceae*), *Dioscorea persimilis* Prain & Burkill (*Doiscoreaceae*), *Zanthoxylum avicennae* (Lam.) DC. (*Rutaceae*). Обнаружение экдистероидов в растениях в концентрациях ниже 0,01 % представляет только научный интерес. Повышенным содержанием экдистероидов характеризуются молодые листья, семена и корни травянистых растений, а у деревьев – кора, которые в соответствующие фазы развития растений могут использоваться в качестве сырья.

Необходимо отметить тот факт, что вопреки имеющимся в литературе данным, полученным с помощью биотестов на личинках насекомых, нами не было подтверждено наличие экдистероидов в растениях *Amaranthus lividus* и *Coix lacrima-jobi*. Причина получения противоречивых данных могла заключаться в ошибочных результатах биотеста, которыми пользовались исследователи в 60–70-х гг. XX в., когда о наличии фитоэкдистероидов, обладающих активностью гормонов линьки насекомых, судили по помутнению кутикулы личинок при погружении в растительные экстракты. По этой же причине, вероятно, мы ошибочно искали экдистероиды в сем. *Araceae*, *Araliaceae* и *Myrsinaceae*.

Экдистероидсодержащие растения в практике народной и научной медицины Вьетнама: прошлый и современный опыт

По итогам наших исследований, несомненно, большой интерес представляло выяснить использование в практических целях растений, в которых нами обнаружены экдистероиды. Оказалось, что настойка из коры дерева *Vitex quinata* повышает аппетит и улучшает пищеварение. Ее используют при ревматизме и чесотке. Кору варят и пьют как чай или настаивают в спирте как тонизирующее средство. Известно об использовании отвара листьев дерева *Dracontomelon duperreanum* для заживления ран. Во Вьетнаме производится препарат «Тайантин» для избавления от курения, в состав которого, кроме экстракта *Dracontomelon duperreanum*, входит экстракт карамболы (*Averrhoa carambola*), в листьях которого мы также обнаружили небольшие количества экдистероидов [8]. Лечебные свойства растений рода *Sida* известны в Индии более 5 тыс. лет, где ее называют Маха Бала и считают эликсиром молодости. В научной медицине это растение используют как психостимулятор и общеукрепляющее средство для снятия хронической усталости. Оно применяется при лечении онкологических заболеваний, является укрепляющим средством до и после химиотерапии. Используется как анаболик для наращивания мышечной ткани, улучшает кровообращение, очищает кровь, нормализует сахар в крови, способствует потере избыточного веса, улучшает обмен веществ. Это растение сейчас широко используется в косметических продуктах – кремах для лица и тела, тониках, лечебных мазях и бальзамах, масках и маслах.

**Результаты анализа образцов растений, собранных в Национальном парке Кук Фьонг,
на содержание 20Е**
**The results of the analysis of plant samples collected in the National Park Cuc Phuong for the content
of 20E**

Вид (номер образца)	Место сбора; экологические условия	Часть растения	Содержание 20Е, %
Сем. Acanthaceae			
<i>Strobilanthes multangulus</i> Benoist (38)	По дороге из Центра Бонг, 200 м на север, не доезжая до станции лесников N 9; 20°16'562" с.ш., 105°40'868" в.д., высота 226 м над ур.м; на склоне холма, густой вечнозеленый лес	листья	следы
<i>Strobilanthes dalzielii</i> (W.W. Sm.) Benoist (76)	По дороге из Центра Бонг на выходе из парка, 20°19'882"с.ш., 105°36'875" в.д., высота 288 м над ур.м	листья	0,003
		корни	0,003
<i>Strobilanthes lilacinus</i> C.B.Clarke (25)	Центр Бонг, зона В, слева от экологической тропы на север к достопримечательности парка «Большое дерево», 20°21'443" с.ш., 105°34'297" в.д., высота 338 м над ур.м	листья	0,004
Сем. Amaranthaceae			
<i>Amaranthus lividus</i> L. (58)	Центральный въезд в Национальный парк, газон справа от въезда	биомасса	0
<i>Achyranthes bidentata</i> Blume (48)	По тропе из Центра Бонг в управление, за беседкой налево в сторону моста, край густого вечнозеленого леса	соцветия	0,17
		листья	0,01
<i>Achyranthes bidentata</i> Blume (72)	Центр Бонг, зона В, обочина тропы на краю густого вечнозеленого леса, 20°20'910" с.ш., 105°35'688" в.д., высота 370 м над ур.м	листья	0,02
		стебли	0,05
		корни	0,03
		соцветия	0,07
<i>Cyathula prostrata</i> (L.) Blume (1)	Центр Бонг, зона В, 20 км западнее от Главного управления парка, 20°21'002"с.ш., 105°35'609" в.д., высота 350 м над ур.м, открытое место при слиянии первичного и вторичного леса на месте поселения народа мынг	листья	0,11
		стебли	0,06
		корни	0,36
<i>Cyathula prostrata</i> (L.) Blume (49)	По тропе из Центра Бонг в управление, за беседкой налево в сторону моста, край густого вечнозеленого леса	соцветия	0,40
Сем. Anacardiaceae			
<i>Dracontomelon duperreanum</i> Pierre (13)	Центр Бонг, зона А, слева у обочины дороги, одиночное крупное дерево	кора	0,22
Сем. Aquifoliaceae			
<i>Ilex rhotunda</i> Thunb. (9)	Центр Бонг, зона В, 20 км западнее от Главного управления парка, на месте поселения народа мынг, одиночное культивируемое дерево	листья	0,06
<i>Ilex purpurea</i> Hassk. (23)	Центр Бонг, зона В, экологическая тропа на север к достопримечательности парка «Большое дерево», 20°21'375" с.ш., 105°34'932" в.д., высота 334 м над ур.м, понижение на выходе известняка	листья	0,004
<i>Ilex cinerea</i> Merr. (39)	По дороге из Центра Бонг, 150 м на север, не доезжая до станции лесников N 9	листья	0,10
Сем. Araceae			
<i>Arisaema balansae</i> Engl. (11)	Центр Бонг, в начале экологической тропы к достопримечательности парка «1000-летнее дерево», под пологом вечнозеленого леса	листья	0
<i>Alocasia cf. macrorrhiza</i> (L.) Schott (22)	Центр Бонг, зона В, понижения вдоль обочин экологической тропы на север к достопримечательности парка «Большое дерево».	листья	0
<i>Aglaonema modestum</i> Schott ex Engl. (24)	Центр Бонг, зона В, экологическая тропа на север к достопримечательности парка «Большое дерево», обочина тропы справа	листья	0
Сем. Araliaceae			
<i>Schefflera octophylla</i> Harms (50)	Дорога в Центр Бонг, 3 км направо от дороги вниз по склону возвышенности 20°16'180" с.ш., 105°41'467" в.д., высота 171 м над ур.м, вечнозеленый лес	листья	0
Сем. Saparaceae			
<i>Crateva nurvala</i> Buch.-Ham. (52)	Центр Бонг, зона А, тропа направо вглубь леса от беседки, 20°17'595" с.ш., 105°40'082" в.д., высота 211 м над ур.м, неглубокий овраг под мостом	листья	0,01
		кора	0

Окончание табл.

Вид (номер образца)	Место сбора; экологические условия	Часть растения	Содержание 20Э, %
Сем. Convolvulaceae			
<i>Ipomoea</i> sp. (57)	Центральный въезд в Национальный парк, слева на газоне	листья	0,01
<i>Ipomoea</i> sp. (31)	Центр Бонг, экологическая тропа, 20°21'019" с.ш., 105°35'582" в.д., высота 351 м над ур.м, слева от тропы на выходе из леса вблизи озера	надземная часть	0,02
<i>Ipomoea congesta</i> R. Br. (77)	Провинция Linh Đam	листья	0,006
Сем. Dioscoreaceae			
<i>Dioscorea persimilis</i> Prain & Burkill (35)	Центр Бонг, зона В, 20°20'941" с.ш., 105°35'682" в.д., высота 325 м над ур.м, обочина дороги	надземная часть	0,01
		корни	0,004
Сем. Malvaceae			
<i>Sida acuta</i> Burm.f. (70)	Центр Бонг, зона В, 20°20'902" с.ш., 105°35'983" в.д., высота 362 м над ур.м, луг	листья	0,55
		корни	0,13
<i>Sida rhombifolia</i> L. (60)	На входе в Ботанический сад Национального парка, с левой стороны входа	листья	0,17
		корни	0,08
<i>Urena lobata</i> L. (62)	Главная аллея Ботанического сада, справа	листья	0
Сем. Myrsinaceae			
<i>Ardisia corymbifera</i> Mez (7)	Центр Бонг, в начале экологической тропы к достопримечательности парка «1000-летнее дерево», под пологом вечнозеленого леса	листья	0
<i>Ardisia crispa</i> (Thunb.) A.DC. (17)	Дорога в Центр Бонг, 20°20'626" с.ш., 105°36'283" в.д., высота 300 м над ур.м, под пологом вечнозеленого леса	листья	0
Сем. Oxalidaceae			
<i>Averrhoa carambola</i> L. (27)	Центр Бонг, зона В, экологическая тропа на север к достопримечательности парка «Большое дерево», рядом с банановой рощей 20°21'259" с.ш., 105°35'115" в.д., высота 343 м над ур.м	листья	0,004
<i>Oxalis corymbosa</i> DC. (30)	Центр Бонг, зона В, экологическая тропа на север к Большому дереву, 20°21'119" с.ш., 105°35'407", в.д., высота 351 м над ур.м	биомасса	0,06
Сем. Poaceae			
<i>Coix lacryma-jobi</i> L. (54)	Вдоль дороги в Центр Бонг, на правой обочине	надземная часть	0
Сем. Rutaceae			
<i>Zanthoxylum avicennae</i> (Lam.) DC. (63)	Культивируемое дерево вдоль главной аллеи Ботанического сада, справа, в глубине насаждений, 20°14'899" с.ш., 105°42'575" в.д., высота 184 м над ур.м	листья	0,002
		соцветия	0,007
		кора	0,04
<i>Zanthoxylum scabrum</i> Guillaum (43)	Там же, правая обочина дороги, 20°16'541" с.ш., 105°40'863" в.д., высота 253 м над ур.м	листья	0,02
Сем. Verbenaceae			
<i>Vitex leptobotrys</i> Hallierf. (8)	Центр Бонг, в начале экологической тропы к достопримечательности парка «1000-летнее дерево» в глубине вечнозеленого леса	побеги	0,17
		листья	0,13
<i>Vitex stylosa</i> Dop (47)	Справа от дороги между станцией N 9 и Управлением, 20°15'126" с.ш., 105°42'773" в.д., высота 146 м над ур.м	листья	0,15
<i>Vitex quinata</i> (Lour.) F.N.Williams (51)	Дорога в Центр Бонг, беседка, направо вглубь леса, 20°17'574" с.ш., 105°40'041" в.д., высота 220 м над ур.м, густой вечнозеленый лес	листья	0,20
		кора	2,68
		листья	0,33
<i>Callicarpa</i> sp. (37)	Центр Бонг, зона В, правая обочина леса, в начале кругового движения 20°20'975" с.ш., 105°35'660" в.д., высота 325 м над ур.м	листья	0
<i>Clerodendrum canescens</i> Wall. ex Walp. (75)	Центр Бонг, на выходе из Национального парка, правая обочина дороги, 20°19'882" с.ш., 105°36'875" в.д., высота 288 м над ур.м	листья	0

Растение *Achyranthes bidentata* завезено во Вьетнам из Китая. В народной медицине Вьетнама его используют для лечения желтухи, малярии и гастрита. Лекарственные формы из растения назначают при артритах, гипертонической болезни, атеросклерозе, мочекаменной болезни, гематурии, аменорее, воспалении слюнных желез, ларингитах. Этот вид растений обладает противовоспалительным эффектом, снижает холестерин, используется при ревматизме, гипертонии, трудных родах, кровотечениях после родов, травмах и ангине. Растение традиционно используется в качестве иммуномодулятора, восстановителя сил и афродизиака.

Во Вьетнаме растение *Cyathula prostrata* используют так же, как корни *Achyranthes bidentata*. Настаивают на спирте для лечения артрита, а водную настойку применяют для лечения ревматизма. В Камбодже корни в сочетании с другими травами используют от заболеваний печени, при лихорадке и дизентерии. В медицине народности мынг, населявшей ранее территорию тропического леса, которая в настоящее время находится в пределах Национального парка Кук Фьонг, упоминаются следующие рода растений, в представителях которых мы обнаружили экдистероиды: *Zantoxylum*, *Achyranthes*, *Sida*, *Vitex*, *Ilex* [9].

В последнее время достигнуты большие успехи в развитии микронутриентологии. В частности, показано, что в рационе современного человека должно присутствовать не только сбалансированное количество известных макронутриентов (белков, жиров и углеводов), но и так называемых микронутриентов или минорных компонентов, поступающих человеку с растительной пищей. Для получения обогащенных микронутриентами функциональных продуктов питания в последние годы не рекомендовано использование растений, содержащих биологически активные вещества в больших концентрациях и относящихся к списку лекарственных. В этих целях могут быть использованы растения, содержащие невысокие концентрации действующих веществ и, что особенно важно, имеющие пищевое значение для человека в прошлом или в наши дни. Однако, примеров известных видов пищевых растений, содержащих фитоэкдистероиды, мало. К ним относятся, например, шпинат (*Spinacia oleracea* L.) и квиноа (*Chenopodium quinoa* Willd.). Оба вида из семейства Chenopodiaceae. Интересно отметить, что среди растений Национального парка Кук Фьонг, в которых мы обнаружили экдистероиды, оказалась группы видов растений, имеющих во Вьетнаме и других странах Юго-Восточной Азии пищевое значение.

Dracontomelon duperreanum – деревья высотой более 20 м, плоды которого употребляют в пищу в Камбодже, Вьетнаме и Китае. Во Вьетнаме дерево называется сәу сәу, а плоды – quả sәu. Во вьетнамской кухне плоды используются в квашеном виде, похожем на японское блюдо «умебоши» (солено-квашеные плоды абрикоса). Засахаренные плоды являются лакомством для детей. Можно видеть, как на улицах Ханоя собирают и тут же продают эти плоды [10]. В будущих исследованиях сле-

дует изучить на содержание экдистероидов другие виды из «положительной» трибы Spondieae семейства Anacardiaceae, произрастающие на территории Вьетнама и имеющие лекарственное и пищевое значение. Известно, что из листьев растений рода *Ilex* люди с древних времен готовят тонизирующие напитки. В Южной Америке из сушеных листьев падуба парагвайского *I. paraguayensis* готовят напиток мате. Имеются сведения об использовании листьев *Ilex purpurea* для приготовления чая во Вьетнаме. Поскольку содержание экдистероидов в изученных нами образцах невысокое, в будущих исследованиях следует установить вклад экдистероидов в тонизирующее и антиоксидантное действие суммарных экстрактов листьев падуба пурпурного.

Выводы

Таким образом, в выборочных трибах и семействах покрытосеменных растений во флоре Национального парка Кук Фьонг (Северный Вьетнам) проведен направленный скрининг на содержание экдистероидов. Всего выявлено 23 экдистероидсодержащих вида. Среди них виды, имеющие лекарственное и пищевое значение в традиционной медицине и кухне Вьетнама. В дальнейшем следует на принципах хемосистематики и молекулярной филогенетики с привлечением данных этно-ботанических исследований продолжить поиск экдистероидов в растениях флор Центрального и Южного Вьетнама.

Авторы благодарят сотрудников Национального парка Кук Фьонг за неоценимую помощь в проведении исследований на территории парка.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Комплексной программы президиума УрО РАН по теме: «Получение клеточных культур экдистероидсодержащих растений рода *Vitex* (Verbenaceae) и научные основы их биотехнологического использования» (УрО РАН № 18-4-4-40) и Плана научно-исследовательских работ Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра на 2018 г. по теме: «Биологически активные вещества тропических растений и микроорганизмов» (Эколан М-4.1).

Литература

1. Lafont R., Dinan L. Practical uses for ecdysteroids in mammals and human: an update // Insect. Sci., 2003. 3. 1–30 p. <https://doi.org/10.1673/031.003.0701>
2. Володин В.В., Мамеев С.И. Экдистероидсодержащие растения – источники новых адаптогенов // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2011. Т. 7. № 2. С. 52–59.
3. Volodin V. V., Volodina S.O. Floristic and molecular phylogenetic analysis of the distribution of phytoecdysteroids among plants of North-East Russia (Asteraceae and Caryophyl-

- laceae) // Biol. and Medicine. 2015. № 7(1). С. 1–23.
4. *Seed plants of Cuc Phuong National Park, Viet-nam. A documented checklist.* Agricultural Publ. House, 2004.
5. *Высочина Г.И.* Хемотаксономический метод в подборе объектов интродукции // Ускорение интродукции растений Сибири: Задачи и методы: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1989. С. 56 – 60.
6. *Lafont R., Bouthier A., Wilson I.D.* Phytoecdysteroids: structures, occurrence, biosynthesis and possible ecological significance // Conf. Insect Chem. Ecol.: Programme and Abstracts. Tabor, 1991. P. 197–214.
7. *Фитоэктоиды* / Под ред. В.В. Володи-на. Санкт-Петербург: Наука, 2003. 293 с.
8. URL: <http://doctortai-krd.com/shop/vspomogatelnye-sredstva-dlya-brosayushchikh-kurit/ekstrakt-tajantin-250ml.html>
9. *Le Thi Xuan, Soejarto D.D.* Selected medicinal plants of Muong Community at Cuc Phuong. Hanoi, 2008. 332 p.
10. URL: <https://alchetron.com/Dracontomelon-2448545-W> Volodin V., Chadin I., Whiting P., Dinan L. Screening plants of European North-East Russia for Ecdysteroids // Biochem. Systematic. Ecol., 2002. Vol. 30. P. 525–578.
3. *Volodin, V.V., Volodina S.O.* Floristic and molecular phylogenetic analysis of the distribution of phytoecdysteroids among plants of North-East Russia (Asteraceae and Caryophyllaceae) // Biol. and Medicine, 2015. No. 7(1). P. 1–23.
4. *Seed plants of Cuc Phuong National Park, Vietnam. A documented checklist.* Agricultural Publ.House, 2004. 760 p.
5. *Vysochina G.I.* Khemotaksonomicheskii metod v podbore obyektov introdukcii // Uskorenie introdukcii rastenij Sibiri: Zadachi i metody [Chemotaxonomic method in the selection of objects of introduction // Acceleration of the introduction of plants of Siberia: problems and methods]: Collection of proc. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch, 1989. P. 56–60.
6. *Lafont R., Bouthier A., Wilson I.D.* Phytoecdysteroids: structures, occurrence, biosynthesis and possible ecological significance // Conf. Insect Chem. Ecol.: Programme and Abstracts. Tabor, 1991. P. 197–214.
7. *Fitoehkdisteroidy* [The phytoecdysteroids]/ Ed. V.V. Volodin. St.Petersburg: Nauka, 2003. 293 p.
8. URL: <http://doctortai-krd.com/shop/vspomogatelnye-sredstva-dlya-brosayushchikh-kurit/ekstrakt-tajantin-250ml.html>
9. *Le Thi Xuan, D.D. Soejarto.* Selected medicinal plants of Muong Community at Cuc Phuong. Hanoi, 2008. 332 p.
10. URL: <https://alchetron.com/Dracontomelon-2448545-W> Volodin V., Chadin I., Whiting P., Dinan L. Screening plants of European North-East Russia for Ecdysteroids // Biochem. Systematic. Ecol., 2002. Vol. 30. P. 525–578.

References

Статья поступила в редакцию 06.08.2018.

УДК 582.736:581.9(571.122):581.6
DOI 10.19110/1994-56-55-2018-3-54-59

ПЕРСПЕКТИВЫ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ КОЗЛЯТНИКА ВОСТОЧНОГО (*GALEGA ORIENTALIS* LAM.) НА ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (В УСЛОВИЯХ ХАНТЫ-МАНСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ)

Е.А. МОИСЕЕВА*, Р.Х. БОРДЕЙ**, З.А. САМОЙЛЕНКО*

*БУ ВО «Сургутский государственный университет», г. Сургут

**НИИ экологии севера БУ ВО Сургутского государственного университета ХМАО – Югры, г. Сургут

lapinaea_vizit@mail.ru, ar80@yandex.ru, zoyasl@yandex.ru

В статье представлены результаты трехлетних интродукционных исследований козлятника восточного (*Galega orientalis* Lam.) на техногенно-нарушенных землях средней тайги Западной Сибири. Впервые для данной территории изучены эколого-биологические особенности вида, обладающего эффективными механизмами адаптации к экстремальным почвенно-климатическим условиям региона. Установлено, что козлятник восточный может быть интродуцирован в качестве сидеральной и высокопитательной кормовой культуры.

Ключевые слова: козлятник восточный, адаптация к условиям Севера, сидерат, кормовая культура, интродукция

E.A. MOISEEVA, R.KH. BORDEY, Z.A. SAMOILENKO. PROSPECTS OF EASTERN GALEGA (*GALEGA ORIENTALIS* LAM.) CULTIVATION ON PODZOLIC SOILS OF WESTERN SIBERIA MIDDLE TAIGA (IN CONDITIONS OF KHANTY-MANSI AUTONOMOUS AREA – YUGRA)

The results of three-year introduction studies of Eastern Galega (*Galega orientalis* Lam.) planted on technogenic disturbed lands in the middle taiga of West Siberia are presented. Eastern Galega biological and biogeocenotic properties are studied for the first time for this territory. The research results revealed the effective adaptation mechanisms of the species to extreme edaphic and climatic conditions. The possibility of effective introduction of Eastern Galega into the region as a sideral and highly nutritious forage crop is established. By the end of the third year of the species vegetation the humus content in the arable horizon ranged from 6.0% to 7.4% compared to 5.0% control value. P_2O_5 content was within 293–374 mg/kg, exchange potassium - less than 50 mg/kg, soil solution reaction - 4.0–5.3 pH units. Galega herbage yield was 60–470 centner/ha. Crude fiber content in the studied specimen amounted to 23–28 %, crude fat – 2.5–2.9 %, crude ash – 7.2–8.1 %, crude protein – 12.3–16.2 %, digested protein per 1 feed unit - 112–123 g, metabolizable energy – 9.4–10 MJ/kg, 0.7–0.8 feed units per 1 kg of dry matter; all above indicate high feeding value of this crop specimen.

Keywords: *Galega orientalis* Lam., adaptation to the conditions of the North, siderat, fodder culture, introduction.

Введение

Экстремальные климатические условия средней тайги Западной Сибири (низкие температуры воздуха с резкими суточными перепадами, короткий вегетационный сезон, промывной режим и наличие мерзлотных процессов в почве) сдерживают воспроизводство гумуса и ограничивают эффективное использование почвенных ресурсов региона. Для их сохранения и рационального использования одним из приоритетных направлений становится биологическое земледелие. В условиях интенсивно

используемых техногенно нарушенных земель, к которым необходимо отнести территорию Западной Сибири, особенно остра необходимость интродукции растений, обладающих высокой экологической пластичностью и ценными биологическими свойствами. Перспективной культурой для решения данной проблемы в последние десятилетия является новая нетрадиционная бобовая культура – галега восточная, или козлятник восточный (*Galega orientalis* Lam.). Она отвечает не только вышеперечисленным требованиям, но при этом, обладая мощной корневой системой, высокой скоростью линей-

ного роста и облиственностью, может применяться в озеленении города и обеспечить прочную кормовую базу для развития животноводства и охотоводства в регионе. Теоретические и практические вопросы интродукции галеги восточной в условиях Ханты-Мансийского автономного округа изучены слабо [1]. Цель наших исследований – оценить с учетом агрохимических показателей плодородия подзолистых почв продуктивность и кормовые достоинства козлятника восточного при его введении в культуру в условиях средней тайги Западной Сибири.

Количество выпавших осадков за исследуемые вегетационные периоды менялось от 144,6 мм (2013 г.) до 471 мм (2015 г.). Сумма эффективных температур $\geq 5^{\circ}\text{C}$ варьировала от $1347,25^{\circ}\text{C}$ до $1793,1^{\circ}\text{C}$, температур выше 10°C – от $1291,5^{\circ}\text{C}$ до $1597,3^{\circ}\text{C}$. Вегетационный период 2013 г. характеризовался недостаточным поступлением осадков в почву и умеренными температурами. Сумма эффективных температур $\geq 10^{\circ}\text{C}$ составила $1597,3^{\circ}\text{C}$, ГТК – 0,8. В период вегетации 2014 г. отмечено недостаточное поступление влаги с атмосферными осадками. ГТК составил 1,2, при норме 1,7, что указывает на низкую влагообеспеченность. Сумма эффективных температур $\geq 10^{\circ}\text{C}$ составила $1291,5^{\circ}\text{C}$, недобор осадков – 10 % от нормы. Вегетационный сезон 2015 г. отличался от предшествующих годов исследования избыточным переувлажнением (ГТК – 2,6). Осадков выпало 741 мм, или 149 % от нормы при среднесуточной температуре воздуха $12,5^{\circ}\text{C}$ (норма $11,6^{\circ}\text{C}$). Сумма эффективных температур выше 10°C – $1576,5^{\circ}\text{C}$.

Материал и методы

В почвенно-климатических условиях тайги Западной Сибири был заложен полевой опыт с сортом Гале (с 1988 г. включен в Государственный реестр РФ).

Исследования проведены в 2013–2015 гг. на опытном участке Сургутского государственного университета в пгт. Барсово (Сургутский район Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО-Югра) в 2013–2015 гг. Опыт заложен согласно следующей схеме: 1. Посев неинокулированных семян (Контроль); 2. Посев инокулированных Байкалом-ЭМ1 семян; 3. Посев неинокулированных семян козлятника под покров гороха.

Определение количества элементов питания (NPK) в слое почвы 0–40 см и кормовую оценку проводили по общепринятым методикам в аккредитованной (акт аккредитации № RA. RU. 21ПЧ23 от 19.08.2015) испытательной лаборатории ФГБУ «Станция агрохимической службы «Мариинская», г. Йошкар-Олы.

Исследуемый участок окультуренный, почва песчаная подзолистая с содержанием гумуса 5,63 % (по Тюрину), pH сол. – 5,21 (по методу ЦИНАО), сумма поглощенных оснований – 4,7 ммоль/100 г почвы (по Капенну), N-NH_4 – 3,85 мг/кг почвы (по ЦИНАО), N-NO_3 – 129 мг/кг почвы (ионометрическим методом), P_2O_5 – 396,1 мг/кг почвы (по Кирсанову), K_2O – 66,5 мг/кг почвы (по Кирсанову). Агротехника возделывания козлятника восточного в ус-

ловиях Сургутского района не изучена. Подготовка почвы, скарификация семян и посев проводились вручную. Норма высева 2,8 млн. всхожих семян/га. Глубина заделки семян при посеве на песчаных почвах 2–3 см [2, 3]. Предпосевная подготовка семян микробиологическим удобрением Байкал-ЭМ1 выполнена в соответствии с рекомендациями. В варианте опыта с бинарным посевом (козлятник с горохом) предпосевная подготовка семян не проводилась. В этом варианте опыта после окончания вегетации горох не убирался.

Делянки в опыте размещались сплошным методом. Общая посевная площадь делянок – 12 м², учетная площадь делянки – 1 м², общая учетная площадь – 4 м². Опыт заложен в 4-кратной повторности. При выполнении исследований использованы общепринятые методики [4–6].

Учет урожая, отбор растительных и почвенных образцов козлятника восточного проведены в конце вегетационного сезона с установлением в течение 5 суток среднесуточной температуры воздуха ниже $+5^{\circ}\text{C}$. Во всех растительных образцах определялись: сырой протеин, сырая клетчатка и сырой жир, сырая зола, кальций и фосфор (методом спектроскопии в ближней инфракрасной области, ГОСТ 32040–2012), содержание влаги – (ГОСТ 54951–2012), легкогидролизуемые углеводы – (ГОСТ 26176–91 п. 2), калий – (пламенно-фотометрическим методом, ГОСТ 30504–97), каротин – (ГОСТ 13496.17–95 п. 1). Сведения о кормовых единицах и обменной энергии в полученной массе козлятника определены расчетным способом.

Результаты и обсуждение

Содержание гумуса и питательных элементов в почве

Содержание гумуса. При возделывании козлятника восточного на подзолистой почве на третий год жизни культуры в пахотном горизонте (0–30 см) отмечен прирост гумуса (табл. 1).

Таблица 1

Динамика содержания гумуса и элементов питания в почве после возделывания козлятника в условиях интродукции (среднее за 2013–2015 гг.)

Table 1

Dynamics of humus and nutrients content in soil after Galega cultivation in introduction conditions (average for 2013–2015)

Вариант опыта	Год жизни	Гумус, %	Кислотность солевой вытяжки, ед. pH	Массовая доля фосфора, мг/кг	Массовая доля калия, мг/кг
Исходные показатели почвы до посева		5,3	4,0	382,0	30
Контроль	1	5,3	4,0	382,2	30
	2	3,2	4,4	437,0	24
	3	5,0	4,2	300,0	< 50
Инокуляция семян Байкалом – ЭМ1	1	5,0	4,0	374,2	33
	2	4,0	5,3	375,0	21
	3	7,4	4,3	374,0	< 50
Посев семян под покров гороха	1	4,1	4,3	255,3	52
	2	4,2	4,4	386,0	31
	3	6,0	4,2	293,0	< 50
HCP ₀₅	1	0,1	0,48	0,35	-
	2	0,20	0,19	1,0	-
	3	0,18	0,28	1,1	-

Максимальный прирост гумуса в варианте с посевом инокулированных семян составил 40 % к фоновым значениям 2013 г. и 37 % – к контролю в 2015 г. Бинарный посев обеспечил увеличение содержания данного показателя в пахотном горизонте почвы только на 13 % к исходным данным и на 20 % – к контрольным показателям. В первый и второй года интродукции козлятника отмечено общее снижение гумуса в почве. Возможно, это связано с усилением микробной активности почвы под влиянием жизнедеятельности интродуцента.

Изучаемые приемы возделывания козлятника восточного за три года исследований существенно не повлияли на реакцию почвенного раствора. К концу вегетационного сезона 2013 г. содержание *подвижных форм фосфора* в почве по вариантам опыта были различными. Покровный посев козлятника в год посева растений привел к достоверному снижению уровня содержания подвижного фосфора на 33 % в сравнении с исходными показателями (382 мг/кг почвы) ($\alpha > 0,05$). Это, вероятнее всего, обусловлено более активным биологическим потреблением фосфора покровной культурой. На второй год вегетации по всем вариантам опыта отмечена тенденция к накоплению P_2O_5 в пахотном горизонте. Особенно интенсивно этот процесс наблюдался при бинарном посеве козлятника с горохом. Содержание подвижной формы фосфора увеличилось на 51% (сравнение с осенью 2013 г.).

Существенных различий по содержанию *обменного калия* (K_2O) в пахотном горизонте почвы в год посева в двух вариантах опыта (контрольный опыт и вариант с применением Байкала-ЭМ1) по сравнению с исходными показателями почвы не наблюдалось. Максимальное значение K_2O отмечено при посеве интродуцента под покров гороха (52 мг/кг почвы). Вероятнее всего, это связано с усилением микробиологического процесса в этом варианте опыта. Начиная с 2014 г. в пахотном горизонте подзолистых почв прослеживается четкая тенденция к снижению содержания обменного калия.

В целом, можно сказать, что зеленая масса гороха в варианте с подсевом его под козлятник, способствовала увеличению подвижности калия и мобилизации его в пахотном горизонте уже в первый год жизни растений. При этом за счет повышения содержания гумуса эффект последствия подсева гороха отмечается и на второй год.

Наблюдения за ростом и развитием козлятника в 2013–2015 гг. позволили установить, что его урожайность при выращивании в условиях средней тайги Западной Сибири определяется в большей степени приемами возделывания и возрастом культуры (табл. 2).

В среднем за три года наблюдений максимальная высота козлятника, независимо от года жизни растений, отмечена в варианте с применением микробиологического удобрения Байкал-ЭМ1 для инокуляции семян – 17,51–133,4 см, что на 30–87 % выше контрольных значений. Подсев дополнительного компонента гороха оказал отрицательное последствие на рост культуры в целом. В год посева в варианте опыта с применением Байкала-

ЭМ1 наблюдалось снижение всхожести семян растений на 30 % по сравнению с контрольными образцами (215 шт/м²). Это отразилось на снижении урожайности козлятника. Интенсивное побегообразование отмечено лишь со второго года жизни культуры: количество побегов увеличилось на 65 % (356 шт/м²) и в два раза (420 шт/м²) – к концу вегетации третьего года жизни в сравнении с контролем (216 и 204 шт/м², соответственно). Анализ динамики густоты стеблевания козлятника выявил, что покровная культура (горох) оказала негативное влияние на развитие стеблестоя интродуцента. Последствие подсева гороха негативно повлияло на количество образовавшихся побегов козлятника как на второй, так и на третий годы вегетации. Так, в год посева густота стеблевания была в сравнении с контролем ниже на 24 %, во второй год – на 43 % и на 47 % – в 2015 г. По-видимому, это связано с тем, что козлятник – это светолюбивая культура, отрицательно реагирующая на затенение, особенно в год посева. В условиях затенения снижаются темпы роста и развития растений, что приводит к замедлению формирования корневой системы и ведет к гибели значительной части растений зимой. Следовательно, с первого года жизни травостоя между компонентами складывались определенные конкурентные взаимоотношения, это последствие проявилось в дальнейшем развитии растений.

С возрастом культуры урожайность козлятника восточного возрастала и за три года составила в контроле: 243 ц/га, в варианте с применением Байкала-ЭМ1 – 280 ц/га, при совместном посеве козлятника с горохом – 66,7 ц/га. Микробиологическое удобрение увеличило урожайность культуры на 15%, сухого вещества – на 11 % от контроля. Дополнительный бобовый компонент в сравнении с контрольными образцами снизил выход зеленой массы на 72,5 %, сухого вещества – на 71 %. В течение трех лет накопление надземной фитомассы козлятника за вегетационный период коррелировало с высотой растений ($r = 0,95–0,94$, $r^2 = 0,901–0,898$).

Результаты наблюдений за ростом и развитием козлятника в культуре позволяют предположить, что дополнительный бобовый компонент гороха еще в год посева оказал угнетающее влияние на рост и развитие интродуцента, вступив с ним в конкурентные взаимоотношения за ресурсы, что в последующем привело к снижению урожайности сырой и сухой массы козлятника восточного.

Питательная ценность культуры. При интродукции кормовой культуры в регион и определении эффективности возделывания культуры для вскармливания животным важное значение имеет оценка химического состава и питательной ценности получаемого корма. В среднем за 2013–2015 гг. установлено, что независимо от варианта опытов с увеличением года жизни травостоя козлятника восточного отмечается и увеличение питательной ценности культуры. Применение удобрения для инокуляции семян перед посевом способствовало увеличению на третий год жизни культуры содержания сырого протеина на 9 %, перевариваемого протеина – на 9,6 %, жира – на 6,8 %, золы – на 3,7 %, об-

Таблица 2

Высота и урожайность козлятника восточного в зависимости от возраста травостоя и приема возделывания в условиях интродукции (среднее за 2013–2015 гг.)

Table 2

Height and crop yield of Eastern Galega depending on the herbage age and cultivation methods in introduction conditions (average for 2013–2015)

Вариант опыта	Высота растений, см		Урожайность, ц/га	
	среднее	± к контролю	зеленой массы / ± к контролю	сухой массы / ± к контролю
1-й год жизни				
Контроль	13,52±1,46	0	140	39
Инокуляция семян Байкалом – ЭМ1	17,51±1,89*	+4,1	120 / + 20	32,4 / - 6,6
Посев семян под покров гороха	13,31±1,26	-0,09	70 / - 70	21 / - 187
НСР ₀₅		0,12		
2-й год жизни				
Контроль	40,55 ±2,52	0	200	56,2
Инокуляция семян Байкалом – ЭМ1	75,83±2,53*	+34,75	250 / + 50	68 / + 11,8
Посев семян под покров гороха	22,00±3,23*	-18,45	70 / - 130	20,9 / - 35,3
НСР ₀₅		2,62		
3-й год жизни				
Контроль	91,9 ±2,52	0	390	111,2
Инокуляция семян Байкалом – ЭМ1	133,4±2,53*	+41,5	470 / + 80	128,8 / + 17,6
Посев семян под покров гороха	42,3±3,23*	-49,6	60 / - 330	18 / - 93,2
НСР ₀₅		2,37		

Примечание. * $P \leq 0,05$ (*– значимость различий α (альфа) < или – 0,05 между вариантами). Коэффициент надежности $P = 0,95$.

Таблица 3

Питательная ценность биомассы козлятника восточного в зависимости от возраста травостоя и приема возделывания в условиях интродукции (среднее за 2013–2015 гг.)

Table 3

Nutritional value of Eastern Galega biomass depending on the herbage age and cultivation methods in introduction conditions (average for 2013–2015)

Вариант опыта	Год жизни	Содержание в сухой биомассе						
		%				г/кг	в 1 кг	
		Сырой протеин	Сырой жир	Сырая зола	Сырая клетчатка	Перевариваемый протеин	Корм. ед.	ОЭ, МДж
Контроль	1	12,3	2,5	7,0	28	102	0,7	9,2
	2	13,6	2,6	7,4	28	114	0,7	9,3
	3	14,7	2,7	7,8	26	123	0,7	9,6
Инокуляция семян Байкалом-ЭМ1	1	14,4	2,7	7,5	28	120	0,7	9,2
	2	14,0	2,6	7,2	26	114	0,7	9,6
	3	16,2	2,9	8,1	23	136	0,8	10
Посев козлятника под покров гороха	1	13,9	2,7	7,4	27	116	0,7	9,5
	2	13,4	2,5	7,2	28	112	0,7	9,3
	3	14,0	2,7	7,5	24	117	0,8	9,8

менной энергии – на 0,4 МДж/кг и снижению в сравнении с контролем сырой клетчатки на 13 %, (табл. 3).

Содержание питательных веществ в козлятнике

Сырой протеин. Максимальное его содержание в сухой биомассе козлятника отмечено в варианте с применением Байкала-ЭМ1. В остальных вариантах опыта существенных различий по годам вегетации культуры не зарегистрировано. С увеличением возраста травостоя наблюдалась тенденция увеличения содержания сырого протеина и, следовательно, ценности кормов из козлятника восточного. Незначительное снижение данного показателя отмечено только в 2014 г., возможно, из-за недостаточной теплообеспеченности вегетационного сезона.

Сырой жир. Независимо от года жизни козлятника в изучаемых вариантах опыта его содержание находилось на одном уровне (2,5–2,9 %), а содержание сырой зола отвечало зоотехническим нормам дойных коров.

Сырая клетчатка. Значение этого показателя в корме более 28–30 % [7] приводит к снижению перевариваемости корма, способности растительными тканями удерживать воду и, в целом, к ухудшению кормовой ценности культуры. Биохимический анализ зеленой массы козлятника восточного показал, что на протяжении трех лет исследований во всех вариантах опыта содержание сырой клетчатки находилось в пределах нормы (23–28 %). На третий год жизни травостоя этот показатель снижался на 2–5 %. Минимальное значение сырой клетчатки наблюдалось в варианте с инокуляцией семян микробиологическим удобрением (23 %), что свидетельствует о положительном влиянии Байкала-ЭМ1 на питательную ценность корма.

Перевариваемый протеин. Максимальное его содержание характерно для биомассы козлятника восточного, выращенного из инокулированных семян. Данный показатель составил 114–136 г. на 1 кг сухой биомассы интродукента, что в среднем на 10% выше контрольных значений. Отмечено так-

же постоянное возрастание по годам содержания перевариваемого протеина в биомассе козлятника с контрольного варианта опыта – на 20,5 % и на 13% в варианте с применением Байкала-ЭМ1. Незначительное сокращение данного показателя в 2014 г. (второй год вегетации), а также снижение содержания сырого протеина авторы связывают с уменьшением теплообеспеченности вегетационного периода. Бинарный посев козлятника с горохом оказал положительное влияние и обеспечил только в год посева в сравнении с контролем (102 г/кг СВ) перевариваемого протеина на 14 г. В дальнейшем наблюдалось негативное последствие гороха на питательную ценность полученной биомассы. В целом за три года исследований инокуляция семян козлятника обеспечила содержание перевариваемого протеина 164 г/кг на 1 корм. ед. и в 1 МДж обменной энергии – 12,8 г. (норма для дойных коров 8–12 г), при контрольных значениях 161 и 12,0 г соответственно. Для биомассы, полученной с варианта совместного посева козлятника с горохом, данные показатели соответствовали значениям 153 и 12 г на 1 кг СВ.

Содержание кормовых единиц в 1 кг сухого вещества биомассы интродуктора за три года наблюдений составило 0,7–0,8 корм. ед., что свидетельствует о хороших кормовых достоинствах культуры.

Концентрация обменной энергии в среднем за все годы исследований составила по вариантам опыта в единице абсолютно сухого вещества биомассы козлятника 9,4–9,6 МДж/кг СВ. Наибольшие показатели отмечены на третий год вегетации в варианте с инокуляцией семян козлятника перед посевом – 10 МДж/кг (при контрольных значениях 9,6 МДж/кг). В целом, анализ содержания питательных веществ в сухом веществе козлятника восточного показал, что биомасса козлятника, полученная в условиях средней тайги Западной Сибири, по химическому составу соответствует зоотехническим нормам кормления для дойных коров.

Закключение

Козлятник восточный может стать перспективной кормовой и почвоулучшающей культурой для возделывания на подзолистых почвах средней тайги Западной Сибири. Эту культуру отличает высокая экологическая пластичность к неблагоприятным условиям среды, высокая биологическая продуктивность и кормовые достоинства. Введение козлятника в культуру наиболее перспективно с использованием перед посевом для инокуляции семян микробиологического удобрения Байкал-ЭМ1. С накоплением растительных остатков в почве увеличивается содержание гумуса на 40 % (по отношению к фоновым значениям). Подкормка обеспечила увеличение урожайности зеленой массы козлятника (280 ц/га) на 15 %. Отмечено процентное увеличение и целый ряд других показателей: сухое вещество – 11%, сырой протеин – 9%, жир – 6,8%, зола – 3,7 %, перевариваемый протеин – 9,6 %. Обменная энергия увеличилась на 0,4 МДж/кг. В сравнении с контролем количество сырой клетчат-

ки снизилось на 13 %. Подсев второго бобового компонента оказал угнетающее действие на рост и развитие козлятника восточного. Дополнительный бобовый компонент уменьшил выход зеленой массы интродуктора (66,7 ц/га) на 72,5 %, сухого вещества – на 71 %. Зеленая масса козлятника обладает высокой питательной ценностью и может использоваться для кормления животных с первого года вегетации интродуктора.

Литература

1. *Лапина Е.А., Шепелева Л.Ф.* Эколого-биоморфологические особенности развития козлятника восточного (*Galega orientalis* L.) первого года интродукции в условиях средней тайги Западной Сибири // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. №6 (167). С. 30–35.
2. *Пузырева М.Л.* Технология возделывания козлятника восточного на корм и семена в подтаежной зоне Томской области: методические рекомендации РАСХН / Сиб. отд-ние. СибНИИСХиТ. Томск, 2006. 28 с.
3. *Адаптивная технология* возделывания козлятника восточного на корм и семена (рекомендации) / С.Н.Надежкин, И.Ю.Кузнецов, Н.В.Казанцева, А.Х.Нугуманов, Я.З.Каипов, И.Л.Аллабердин, И.П.Леонтьев. М.: ФГУ РЦСК, 2008. 48 с.
4. *Станков Н.З.* Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 280 с.
5. *Ничипорович А.А., Кузьмин З.Е., Полозова Л.Я.* Методические указания по учету и контролю важнейших показателей процессов фотосинтетической деятельности растений в посевах. М.: ВАСХН, 1969. 93 с.
6. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1973. 335 с.
7. *Александрова С., Степанов С.* Питательная ценность козлятника восточного в подтаежной зоне Омской области // Главный зоотехник. 2014. № 6. С. 8–14.

References

1. *Lapina E.A., Shepeleva L.F.* Ekologo-biomorfologicheskie osobennosti razvitiya kozlyatnika vostochnogo (*Galega orientalis* L.) pervogo goda introdukcii v usloviyah srednej tajgi Zapadnoj Sibiri [Ecological and biomorphological peculiarities of Eastern Galega (*Galega orientalis* L.) development in the first year of introduction in Western Siberia middle taiga conditions] // Bull. of Orenburg State Univ. 2014. №6 (167). P. 30–35.
2. *Puzyreva M.L.* Tekhnologiya vozdeliyvaniya kozlyatnika vostochnogo na korm i semena v podtaezhnoj zone Tomskoj oblasti [Eastern Galega cultivation methods for fodder and seeds in the taiga zone of Tomsk Region: methodic recommendations of Russian Acad. of Agric. Sciences / Siberian Branch. Siberian Res. Inst. of Agric. and Techn. Tomsk, 2006. 28 p.
3. *Nadezhkin S.N., Kuznetsov I.YU., Kazantseva N.V., Nugumanov A.Kh., Kaipov Ya.Z., Allabe-*

- rdin I.L., Leontyev I.P* Adaptivnaya tekhnologiya vozdel'yvaniya kozlyatnika vostochnogo na korm i semena (rekommendacii) [Eastern Galega adaptive cultivation method for fodder and seeds (recommendations)]. Moscow: FGU RCSI, 2008. 48 p.
4. *Stankov N.Z.* Kornevaya sistema polevyh kul'tur [Field crops root system]. Moscow: Kolos, 1964. 280 p.
 5. *Nichiporovich A.A., Kuz'min Z.E., Polozova L.Ya.* Metodicheskie ukazaniya po uchetu i kontrolyu vazhnejshih pokazatelej processov fotosinteticheskoy deyatel'nosti rastenij v posevah [Methodic recommendations for registering and monitoring of the main processes of plants photosynthetic activity in crops]. Moscow: All Union Acad. of Agric. Sciences, 1969. 93 p.
 6. *Dospekhov B.A.* Metodika polevogo opyta [Field experiment methods]. Moscow: Kolos, 1973. 335 p.
 7. *Aleksandrova S., Stepanov S.* Pitatel'naya cennost' kozlyatnika vostochnogo v podtaezhnoj zone Omskoj oblasti [East Galega nutrition value in the taiga zone of Omsk Region] // Glavnii zootekhnik. 2014. № 6. P. 8–14.

Статья поступила в редакцию 15.03.2018.

УДК 911.8(502)
DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-60-65

ФОРМИРОВАНИЕ НОВОГО ОЧАГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В РОССИЙСКО-НОРВЕЖСКОМ ПОРУБЕЖЬЕ

Т.М. КРАСОВСКАЯ, Г.П. ПОКРЫТАН

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва
krasovsktex@yandex.ru

Рассматриваются условия формирования на территории Норвегии потенциального очага загрязнения атмосферы вблизи российской границы, связанного с разработкой железорудного месторождения Бьёрневатн. В исследовании использованы методические принципы проведения ОВОС (Оценка воздействия на окружающую среду) в России и за рубежом с учетом региональной специфики. На основе сопряженного анализа метеорологической информации, определения потенциала загрязнения атмосферы, экологических характеристик аналогичного производства, расположенного на территории России в тех же ландшафтных условиях, выделяются периоды «опасных» направлений ветра и зона воздействия, в которую частично попадает заповедник Пасвик.

Ключевые слова: аэротехногенные поллютанты, трансграничный перенос, прогноз, метеоусловия, зона влияния, Бьёрневатн

T.M. KRASOVSKAYA, G.P. POKRYTAN. THE FORMATION OF A NEW SOURCE OF ATMOSPHERE POLLUTION IN THE NORWEGIAN- RUSSIAN BORDERLINE REGION

Preconditions for formation of a potential source of atmosphere pollution in the Norwegian territory near the Russian border connected with the resumption of iron-ore deposit development in Bjørnevattn are discussed. The methodological principles of EIA in Russia and abroad, taking into account regional specifics, were used in the study. The lack of project documentation predetermines the primary nature of the estimates made using the analog method. Joint processing of meteorological information, atmosphere pollution potential assessment, factors promoting risk of heightened air-born pollutants accumulation, as well as ecological characteristics of the similar enterprise located in the territory of Russia in the same landscape conditions enabled to forecast periods of "dangerous" winds directions and the impact zone which partially includes Pasvik Nature reserve to which territory the air-born pollutants can come with Northern winds, with wind flow velocity - 6 m/s. Recommendations for monitoring are provided.

Keywords: air-born pollutants, transboundary transportation, forecast, meteorological conditions, impact zone, Bjørnevattn

Введение

Развитие экономики приграничных территорий сопредельных государств может оказывать существенное влияние на их экологическую обстановку, неблагоприятные изменения которой чаще всего происходят за счет трансграничных переносов загрязняющих веществ воздушными потоками и поверхностным стоком. Конвенция ООН о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния регламентирует взаимные обязательства государств по предотвращению загрязнения атмосферы [1]. Несмотря на это, данная проблема до сих пор актуальна для многих стран, а в Европе контролируется в рамках Международной программы ЕМЕП [2]. Наибольшую озабоченность при трансграничном загрязнении вызывают проблемы загрязнения мелкодисперсными пылевыми частица-

ми, диоксидом серы, оксидами азота и другими аэротехногенными поллютантами [3].

Российско-Норвежские приграничные районы, начиная с 60-х гг. XX в., находятся в центре внимания трансграничного мониторинга выбросов горно-металлургического комбината «Печенганикель» (г. Никель) Кольской горно-металлургической компании, которые долгое время формировали острую экологическую проблему в порубежье. Озабоченность ситуацией норвежская сторона высказывает и поныне. Однако последовательная экологическая модернизация металлургического производства в г.Никель постепенно снижает негативное влияние на природную среду [4].

Потенциальная возможность трансграничного загрязнения с норвежской территории в результате развития экономики приграничных районов губернии Финнмарк практически не рассматривает-

ся. Однако такое воздействие вполне возможно, что показал расчет трансграничных коэффициентов экологической нагрузки, показывающей соотношение различных социально-экономических данных, влияющих на неё [5]. В связи с этим, настоящее исследование посвящено выявлению новых потенциальных очагов загрязнения аэротехногенными поллютантами на территории Российско-Норвежского порубежья.

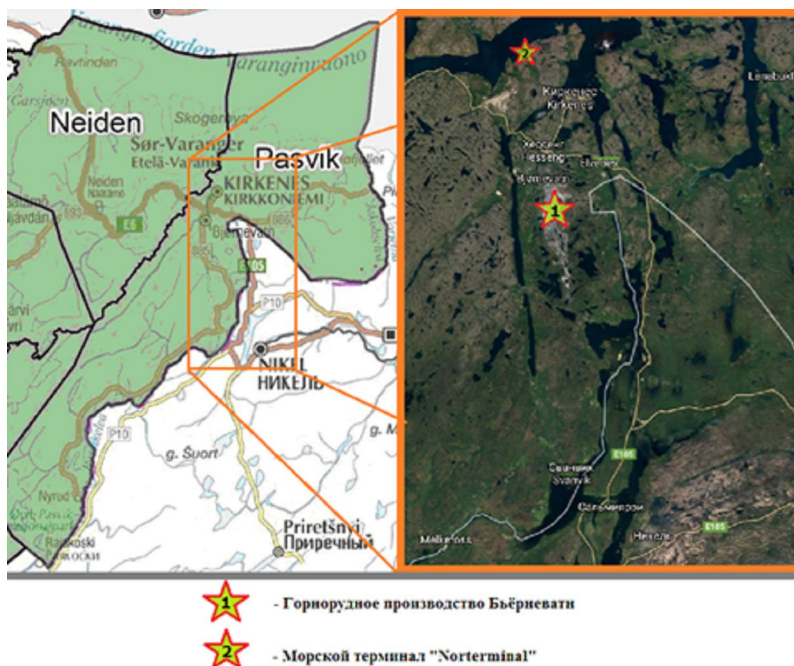


Рис. 1. Район исследования с отмеченными потенциальными источниками трансграничного загрязнения со стороны Норвегии.
Fig.1. Study area. Potential sources of transboundary pollution from Norway are marked.

Территория исследования

Российско-Норвежское порубежье (рис. 1) в административном отношении – это части губернии Финнмарк (коммуна Сёр-Варангер) в Норвегии и Печенгского района Мурманской области России (рис.1).

Ландшафты Российско-Норвежского порубежья представлены зональными северотаежными и лесотундровыми геосистемами, а также интразональными луговыми и болотными геосистемами. Многочисленные исследования характеризуют представленные на территории ландшафты, как обладающие низкой устойчивостью к техногенному воздействию. Это связано с замедленным биогеохимическим круговоротом, бедностью и маломощностью почв на значительной части территории, их низкой буферностью к подкислению, характером растительного покрова, легко повреждаемого кислотными осадками, длительным периодом самовосстановления, сложностью стимулирующих его мелиораций и т.д. [6, 7].

Рассматриваемая международная трансграничная хозяйственная структура сочетает в себе

общие и специфические черты природопользования, получившего развитие по обе стороны границы. Природоохранное, лесохозяйственное и рекреационное природопользование, занимающие наибольшие площади, представлено различными категориями ООПТ, крупнейшими из которых являются заповедник «Пасвик» (Россия) и национальный парк «Верхний Пасвик» (Норвегия), а также защитными лесами, ограниченными эксплуатационными лесами.

Промышленное природопользование формируют следующие хозяйственные структуры: горно-металлургическое производство в Никеле, горнодобывающее железорудное производство Сюд-Варангер (Syd-Varanger) [8], Бьёрнватн (2 км от границы России) (рис.1, 2), с обогатительной фабрикой в Киркенесе (8 км от границы России). Транспортное природопользование представлено сетью автомобильных дорог, основное экологическое влияние которых проявляется во фрагментации природных ландшафтов. Промышленное и сельское природопользование носят очаговый характер, однако именно с ними сопряжено формирование импактного района Никеля, окруженного техногенными пустошами. Очаговым является и сельскохозяйственное природопользование (молочное животноводство, кормопроизводство, овощеводство). Традиционное природопользование представлено в Норвежском порубежье саамским оленеводством. Значительные лесные и лесотундровые площади изучаемой территории относятся к землям запаса и не используются.

На большей части изучаемой территории антропогенные изменения ландшафтов выражены слабо и связаны с механическими нарушениями в результате прокладки дорог, открытых разработок полезных ископаемых, занимая ограниченные площади [9,10].

Материал и методы исследования

В исследовании использованы методические принципы проведения ОВОС в России и за рубежом с учетом региональной специфики [11–13]. Отличия связаны с отсутствием проектной документации, что предопределяет первичный характер оценки. Системный анализ, основанный на полученных ранее результатах полевых исследований и математического моделирования, определил методику работы.

Основными материалами исследования послужили: База данных Норвежской метеорологической службы, российские данные метеонаблюдений на станциях Янискоски и Никель, материалы дистанционного зондирования (спутниковые снимки) для территории месторождения железистых кварцитов Бьёрнватн и г.Киркенес, серия тематических карт на территорию Финнмарка (геологическая, гео-



Рис. 2. Карьер Сюд-Варангер [8].
Fig.2. Open-cast mine Syud-Varanger [8].

морфологическая, растительного покрова, климатические и др.), фондовые материалы (научные отчеты) Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) Кольского НЦ РАН по характеристике Никельского импактного района и мониторингу промышленного загрязнения природной среды и т.д., а также и информационные Интернет-порталы Норвегии [14, 15].

Результаты исследования

Характеристика потенциальных источников поступления аэротехногенных поллютантов. Потенциальным источником загрязнения является месторождение железной руды Бьёрнватн. Компания Tschudi, владеющая месторождением, возобновила производство после остановки в конце 1990-х гг. [16]. Источниками поступления аэротехногенных поллютантов при производстве работ на месторождениях являются технологические процессы, связанные с открытой добычей и транспортировкой рудной массы. Основными аэротехногенными поллютантами являются пыль, оксиды азота, диоксид серы и легкоокисляющиеся соединения. Наибольшую долю загрязнения будут составлять пыль и диоксид серы. Это подтверждают мониторинговые данные в Никельском импактном районе [4].

Метеоусловия, способствующие трансграничному переносу аэротехногенных поллютантов. В условиях отсутствия проектной документации по технологии добычи руд на месторождении

для осуществления задач данного исследования представляется необходимым оценить местные метеоусловия, определяющие вероятность дальнего переноса аэротехногенных поллютантов. На основе метеорологических данных Норвежской метеорологической службы можно сделать вывод, что на исследуемой территории большую часть года преобладают ветра южных направлений. Ситуация будет меняться в апреле, летом преобладающими будут ветра С, ССВ и СВ направлений. Средняя скорость ветра составляет 4.7 м/сек с максимальным значением в марте (5.7 м/сек) и минимальным в августе (3.4 м/сек). Максимальные зафиксированные значения скорости ветра – 30 м/с, отдельные порывы достигают 40 м/с, что способствует активному переносу атмосферных загрязнителей.

На основании собранных за семь лет метеорологических данных был рассчитан индекс потенциального риска загрязнения атмосферы (ПРЗА) [17] территории, который составил 0,531. Это соответствует низкому потенциалу риска загрязнения. Однако более детальный анализ распределения характеристик температуры и влажности показывает, что внутри района индекс риска повышается в результате частого формирования приземных температурных инверсий в холодный период, образования туманов, способствующих длительному нахождению поллютантов в воздухе.

Картографирование путей переноса и потенциального накопления аэротехногенных пол-

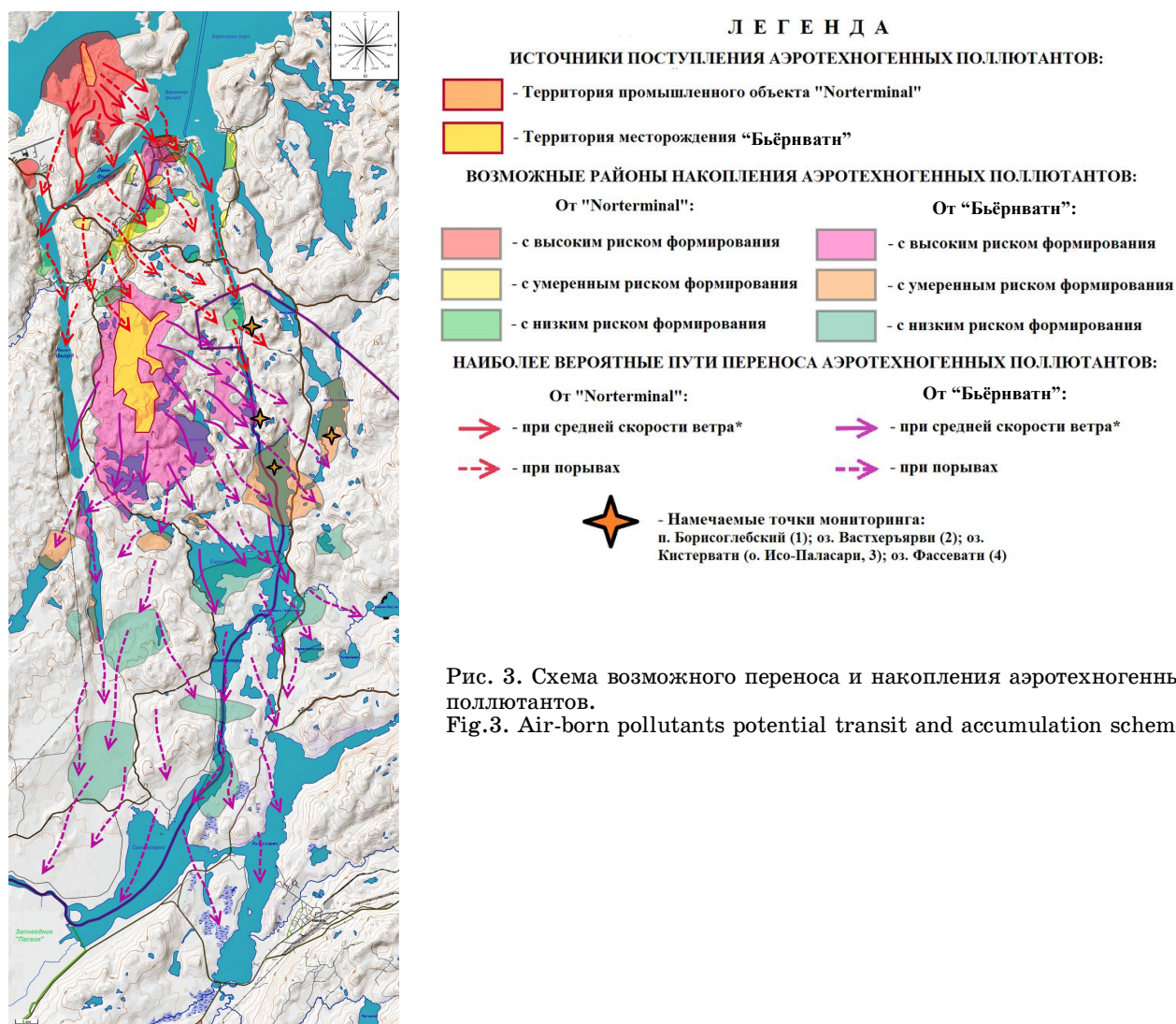


Рис. 3. Схема возможного переноса и накопления аэротехногенных поллютантов.

Fig.3. Air-borne pollutants potential transit and accumulation scheme.

поллютантов. Обобщенные данные по особенностям возможного ветрового переноса аэротехногенных поллютантов от обозначенных выше источников позволили показать пути переноса на картосхеме (рис. 3). Она составлялась, исходя из наиболее неблагоприятной метеорологической ситуации (максимальная возможность трансграничного переноса) – ветра летнего периода С, СЗ, ССЗ направлений, которые в сумме достигают 29,3% от преобладающих ветров в этот сезон. По данным за последние пять лет средняя скорость ветра в летний период составила 4,1 м/с, однако с высотой в отдельные периоды она может существенно увеличиваться.

Для картографирования использован наш опыт полевых исследований по выявлению и моделированию ареалов распространения аэротехногенных поллютантов [6,9]. Кратко он состоял в следующем. Границы ареалов районов возможного накопления аэротехногенных поллютантов проводились, исходя из направлений преобладающих ветров, характеристик рельефа (высоты, направления расположения хребтов и т.д.) с учетом средней высоты переноса. Градации высокого, умеренного и низкого риска вероятности накопления поллютантов в природной среде устанавливались на основе

предполагаемых зон осаждения поллютантов, зависящих от факторов, основные из которых представлены в табл. 1, а также скорости ветра. В целом, области выпадения, согласно данным ИППЭС Кольского НЦ РАН, ограничивались бассейном приграничной р. Паз. Обогащительная фабрика как источник поступления поллютантов в связи со спецификой своей деятельности не имеет высоких труб. Пылевое же облако при массовом взрыве в карьере может достигать высоты 150–300 м, в своем развитии оно способно подниматься на несколько километров высоты. Возможная зона максимального распространения поллютантов определялась путем сопоставления с данными полевых наблюдений в аналогичных производственных и природных условиях в близлежащем районе Мурманской области (Оленегорский горно-обогатительный комбинат) и оценивалась до 10 км [4, 6, 9]. Отсутствие сведений об объемах потенциального поступления аэротехногенных поллютантов позволяет рассматривать эту карту как первичную оценку.

Для выделения зон, различающихся по риску накопления аэротехногенных поллютантов, был проведен сопряженный анализ характерных для анализируемой территории сочетаний основных

Факторы, определяющие риск формирования зон накопления аэротехногенных загрязнителей
Factors determining risk of air-born pollutants accumulation zones formation

Факторы, влияющие на накопление	Градации риска формирования удаленных зон загрязнения		
	Высокий риск	Умеренный риск	Низкий риск
Высота выброса	200 м	100 м	50 м
Относительная высота экранирующих хребтов	до 50 м	до 100 м	до 150 м
Характер подстилающей поверхности	Городская застройка	Лесотундровые и лесные участки	Пустоши, тундровые участки
Расстояние от источника загрязнения	0–6,5 км	6,5–10 км	10–15 км

местных природных и антропогенных факторов, определяющих уровень риска, ранжированный по трем категориям: высокий, умеренный, низкий (см. таблицу). Для первичной оценки весовая дифференциация факторов, влияющих на накопление аэротехногенных загрязнителей, не проводилась, но учитывалось их совокупное влияние.

На основании сопряженного анализа характеристик ветрового режима и возможного переноса загрязнителей воздушными потоками с учетом характера подстилающей поверхности и метеословий, способствующих накоплению аэротехногенных загрязнителей, составлена картосхема (рис. 3), где показаны возможные варианты переноса аэротехногенных загрязнителей в сторону российской границы. Максимальное влияние на российскую территорию со стороны месторождения Бьёрнватн будет происходить при ветрах северных и северо-западных румбов в летний период (около 30% от всех), что, со временем, может способствовать формированию вторичного очага загрязнения. Пунктирными стрелками на карте обозначены пути переноса при порывах ветра 6–9 м/с. Эта ситуация рассматривается в нашем исследовании, так как средняя скорость порывов ветра опасных направлений на территории исследования в летний период превышает 7,5 м/с. Это в свою очередь значительно увеличивает дальность переноса загрязнителей.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что современная экологическая ситуация в Российско-Норвежском порубежье может в скором времени измениться. На рассматриваемой территории может сформироваться новый импактный район вокруг очага, расположенного с норвежской стороны. В зоне влияния нового импактного района при северных ветрах более 6 м/с может оказаться заповедник «Пасвик», расположенный на границе России и Норвегии в 27 км к югу от месторождения Бьёрнватн. Ресурсо- и природосберегающие технологии, безусловно, способны минимизировать, но не устранить совсем неблагоприятные изменения природной среды, которые затронут российскую территорию. Для своевременного принятия мер необходимо расширение мониторинговой сети в Россий-

ском порубежье, где действует только одна пограничная мониторинговая станция в п. Райякоски. Картографирование потенциальных ареалов загрязнения позволяет наметить районы для расположения новых пунктов мониторинга, например, в п. Борисоглебский. При этом, возможно, достаточным будет мониторинг загрязнения атмосферы в наиболее "опасные" периоды, что может быть осуществлено передвижными станциями. Полученная первичная оценка нацеливает на углубленное исследование риска формирования нового импактного района, что вполне возможно объединенными усилиями норвежских и российских ученых, имеющих опыт совместных работ в данном районе.

Литература

1. Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/transboundary.shtml Дата обращения 28.11.2017.
2. Ilyin A., Gusev O., Rozovskaya I. Strijkina Transboundary Pollution by Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants in 2014 GER-MANY EMEP/MSC-E Data Note 5/2016. http://www.msceast.org/reports/country_reports/Germany_2014.pdf Дата обращения 15.11.2017.
3. Towards Cleaner Air: Scientific Assessment Report 2016. EMEP Steering Body and Working Group on Effects of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, Oslo. 70 p.
4. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2016 г. Мурманск: Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области, 2016. 180 с.
5. Золотарев А.А., Красовская Т.М. Трансграничные коэффициенты природопользования Российско-Норвежского порубежья // Проблемы региональной экологии. 2016. №4. С.55–60.
6. Евсеев А.В., Красовская Т.М. Эколого-географические особенности природной среды районов Крайнего Севера России. Смоленск: Универсум, 1996. 232 с.
7. Норин Б.Н., Ярмишко В.Т. Влияние промышленного атмосферного загрязнения на основные леса Кольского полуострова. Л.: БИН АН СССР, 1990. 195 с.
8. Баренц регион: Рудники Киркенеса: чистота и простор [Электронный ресурс] Режим доступа: http://barentsregion.blogspot.ru/2014/04/blog-post_29.html. Дата обращения 07.01.2017.
9. Экологический атлас Мурманской области. М.-Апатиты, 1999. 48 с.
10. Диагностический анализ состояния окружающей среды арктической зоны Российской Федерации. М.: Минэкономразвития, 2011. 1236 с.
11. Дьяконов К. Н., Дончева А. В. Экологическое проектирование и экспертиза. М.: «Аспект Пресс», 2002. 383 с.

12. *Guidelines for Environmental Impact Assessment (EIA) in the Arctic*. Sustainable Development and Utilization. Finnish Ministry of the Environment, Finland, 50 p. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/eia/documents/EIAGuides/Arctic_EIA_guide.pdf. Дата обращения 17.11.2017.
13. Koivurova T., Lesser P., Bickford S., Kankaanpää P., Nenashcheva M. Environmental Impact Assessment in the Arctic. A guide to the best practice. Edward Elgar Publishing, Inc., 2016. 311 p.
14. *Statistics Norway*. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ssb.no/en>, Дата обращения 07.01.2017.
15. *Geological Survey of Norway*. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.ngu.no/en>. Дата обращения 19.12.2016.
16. Чуди покупает железный рудник в Арктике // The Independent Barents Observer. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://thebarentsobserver.com/ru/industry-and-energy-kirkenes/2016/10/chudi-pokupaet-zheleznyy-rudnik-v-arktike>. Дата обращения 13.12.2016.
17. Pykh Y. A., Malkina-Pykh I. G. Assessing air pollution risk potential: case study of the Tohoku district, Japan. Air Pollution XIX// 2011. P. 267–276.
6. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Ekologo-geograficheskie osobennosti prirodnoy sredy rajonov Krajnego Severa Rossii [Ecological-geographical environmental patterns in the Far North of Russia]. Smolensk:Universum, 1996.232 p.
7. Norin B.N., Yarmishko V.T. Vliyanie promyshlennogo atmosfernogo zagryazneniya na sosnovye lesa Kol'skogo poluostrova [Industrial air pollution impact on pine forests of the Kola peninsula]. Leningrad: BIN USSR Ac. Sci., 1990.195 p
8. *Barents region: Rudniki Kirkenesa: chistota i proctor* [Barents region: the mines of Kirkenes: cleanness and spaciousness].URL: http://barentsregion.blogspot.ru/2014/04/blog-post_29.html Accessed:07.01.2017.
9. *Ekologicheskij atlas Murmanskoy oblasti* [Ecological atlas of Murmansk region]. Moscow-Apatity, 1999. 48 p
10. *Diagnosticheskij analiz sostoyaniya okruzhayushchej sredy arkticheskoy zony rossijskoj federacii* [Diagnostic analysis of environment in the Arctic zone of Russia]. Moscow: Economic Development Ministry, 2011.1236 p.
11. Dyakonov K.N., Doncheva A.V. Ekologicheskoe proektirovanie i ehkspertiza [Ecological planning and assessment]. Moscow: «Aspekt Press», 2002. 383 p.
12. *Guidelines for Environmental Impact Assessment (EIA) in the Arctic*. Sustainable Development and Utilization. Finnish Ministry of the Environment, Finland, 50 p. URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/eia/documents/EIAGuides/Arctic_EIA_guide.pdf. Accessed: 17.11.2017.
13. Koivurova T., Lesser P., Bickford S., Kankaanpää P., Nenashcheva M. Environmental Impact Assessment in the Arctic. A guide to the best practice. Edward Elgar Publ. Inc., 2016. 311 p.
14. *Statistics Norway*. URL: <http://www.ssb.no/en>. Accessed: 07.01.2017
15. *Geological Survey of Norway*. URL: <https://www.ngu.no/en>. Accessed: 19.12.2016
16. *Chudi pokupaet zheleznyy rudnik v Arktike* [Chudi purchases ferrous ores mine in the Arctic] // The Independent Barents Observer. URL: <https://thebarentsobserver.com/ru/industry-and-energy-kirkenes/2016/10/chudi-pokupaet-zheleznyy-rudnik-v-arktike> Accessed:13.12. 2016.
17. Pykh Y. A., Malkina-Pykh I. G. Assessing air pollution risk potential: case study of the Tohoku district, Japan. Air Pollution XIX// St.Petersburg, Russia, 2011. P. 267–276.

References

1. *Konvencii o transgranichnom zagryaznenii vozduha na bol'shie rastoyaniya* [Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution]. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/transboundary.shtml Accessed: 28.11.2017.
2. Ilyin, A. Gusev, O. Rozovskaya, I. Strijkina. Transboundary Pollution by Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants in 2014. GERMANY EMEP/MSC-E Data Note 5/2016. http://www.msceast.org/reports/country_reports/Germany_2014.pdf Accessed: 15.11.2017.
3. *Towards Cleaner Air: Scientific Assessment Report 2016*. EMEP Steering Body and Working Group on Effects of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, Oslo. 70 p.
4. *Doklad o sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Murmanskoy oblasti v 2016 godu* [Report on environment situation and nature conservation in Murmansk region in 2016]. Murmansk: Ministry of natural resources and ecology of Murmansk region, 2016. 180 p
5. Zolotarev A.A., Krasovskaya T.M. Transgranichnye koehfficienty prirodopol'zovaniya rossijsko-norvezhskogo porubezh'ya // Problemy regional'noj ehkologii [Transboundary nature management coefficients for the Russian-Norwegian borderline region// Problems of regional ecology]. 2016. №4. P.55–60

Статья поступила в редакцию 18.06.2018.

УДК 616.124.3

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-66-69

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СЕРДЦА КРЫС С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЛЕГОЧНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ В ПЕРИОД РЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЖЕЛУДОЧКОВ

О.В. СУСЛОНОВА*, С.Л. СМЕРНОВА*, И.М. РОЩЕВСКАЯ**

*ВНЭБС – филиал ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

**Сыктывкарский государственный университет им. Питиримы Сорокина, г. Сыктывкар

evgeniu2006@inbox.ru

Электрическая активность сердца крыс линии Вистар исследована методами электрокардиографии и многоканального поверхностного картирования. Легочная артериальная гипертензия (ЛАГ) вызывалась путем введения однократной дозы монокроталина (МКТ) (60 мг/кг веса животного, п/к). У крыс через четыре недели после введения МКТ развивается гипертрофия правого желудочка, приводящая к значимому увеличению длительности реполяризации желудочков сердца за счет ее конечного периода и достоверным изменениям амплитудно-временных параметров электрического поля сердца (ЭПС) на поверхности тела по сравнению с исходным состоянием.

Ключевые слова: легочная гипертензия, поверхностное картирование, реполяризация

O.V. SUSLONOVA, S.L. SMIRNOVA, I.M. ROSHCHEVSKAYA. CARDIAC ELECTRIC ACTIVITY IN RATS WITH EXPERIMENTAL PULMONARY HYPERTENSION DURING VENTRICULAR REPOLARIZATION

Cardiac electric activity of Wistar rats with experimentally induced pulmonary arterial hypertension (PAH) in the period of ventricular repolarization was investigated by the methods of electrocardiography and multichannel surface mapping. Pulmonary arterial hypertension was induced by a single subcutaneous injection of monocrotaline (MCT) (60 mg/kg, Sigma-Aldrich, Germany). Cardiac electric potentials were recorded from 64 electrodes evenly distributed around the rat's body, synchronously with the ECG in the leads from the extremities before and 4 weeks after the MCT injection. In the ECG in the second lead from the extremities the duration of the R-R interval, QT and T-wave intervals: J-Tpeak (from the J point to the T-wave peak), Tpeak-Tend (from the T-wave peak to its end) and J-Tend (from the J point to the end of the T-wave) - was measured in three cardiocycles. Heart rate was calculated based on the average value of R-R interval. ECG analysis in the second lead from the extremities revealed significant decrease in heart rate, prolongation of QT-, Tpeak-Tend, J-Tend intervals in rats with experimentally induced pulmonary hypertension. In rats, 4 weeks after the injection of MCT, right ventricular hypertrophy develops, leading to significant increase in the duration of cardiac ventricular repolarization due to its final period and reliable changes in the amplitude-temporal parameters of the cardiac electric field on the body surface compared to the initial state.

Keywords: pulmonary hypertension, surface mapping, repolarization

Введение

ЛАГ – патофизиологическое состояние, характеризующееся повышением давления в малом круге кровообращения, приводящее к гипертрофии правого желудочка (ГПЖ) и развитию тяжелой правожелудочковой сердечной недостаточности [1]. Гипертрофия правого желудочка часто является причиной возникновения желудочковых аритмий, которые повышают риск внезапной сердечной смерти у больных с ЛАГ [2]. Одним из механизмов

возникновения аритмий является повышение электрической гетерогенности миокарда, вызванной изменением процесса реполяризации [3]. Актуальность проблемы диктует необходимость поиска новых подходов к ранней неинвазивной диагностике и маркеров жизнеугрожающих аритмий при развитии ЛАГ.

Цель работы – исследование электрической активности сердца крыс с экспериментальной легочной гипертензией в период реполяризации желудочков.

Материал и методы

Эксперименты выполнены на самках крыс линии Вистар ($n=17$) весом 200–250 г, наркотизированных золетилом (3,5 мг/100 г веса животного в/м). Легочную гипертензию вызывали однократным введением МКТ (60 мг/кг веса животного п/к; Sigma-Aldrich, Germany). До (исходное состояние) и четыре недели после введения препарата униполярные кардиоэлектрические потенциалы регистрировали от 64 электродов, равномерно распределенных вокруг грудной клетки животного от уровня основания ушей до последнего ребра синхронно с ЭКГ в отведениях от конечностей. На ЭКГ во втором отведении от конечностей измеряли длительности R-R интервал, QT и интервалов Т-волны: J-Tpeak (от точки J до пика Т-волны), Tpeak-Tend (от пика Т-волны до ее окончания) и J-Tend (от точки J до конца Т-волны) в трех кардиоциклах. На основе среднего значения R-R интервала вычисляли частоту сердечных сокращений (ЧСС). Анализ ЭПС проводили по эквипотенциальным моментным картам. Отсчет времени (в мс) осуществляли относительно R_{II} пика на ЭКГ. Статистический анализ проводили с использованием пакета STATISTIKA 10.0. Данные представляли в виде среднего арифметического $\pm$ стандартного отклонения. Достоверность оценивали критерием Стьюдента для двух зависимых выборок. Значения считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Ранее нами показано, что у МКТ - индуцированных крыс на четвертой неделе после введения МКТ выявлена гипертрофия правого желудочка сердца без признаков сердечной недостаточности [4]. Анализ ЭКГ во втором отведении от конечностей выявил достоверное снижение ЧСС, удлинение QT-, Tpeak-Tend, J-Tend интервалов у крыс с экспериментально вызванной ЛАГ (табл.1.).

Таблица 1

Электрокардиографические параметры ST-T комплекса и ЧСС у крыс до и после введения МКТ

Table 1

Electrocardiographic parameters of the ST-T complex and heart rate in rats before and after administration of MCT

Параметр	Исходное состояние	После введения МКТ
ЧСС уд/мин	446 $\pm$ 31	399 $\pm$ 33*
Длительность QT, мс	69 $\pm$ 5	86 $\pm$ 8*
J-Tpeak, мс	22,5 $\pm$ 4,3	22,6 $\pm$ 1,9
Tpeak-Tend, мс	32,1 $\pm$ 2,2	41,7 $\pm$ 2,1*
J-Tend, мс	55,5 $\pm$ 5,4	64,5 $\pm$ 3,8*

* – различия значимы по сравнению с исходным состоянием при $p \leq 0,05$.

* – differences are significant compared to the initial values at $p \leq 0,05$.

Кардиоэлектрическое поле, характерное для периода реполяризации желудочков (до и после четвертой недели после введения МКТ), формируется на поверхности тела крыс в период восходящей части S_{II} -волны. В начальную фазу реполяри-

зации желудочков в исходном состоянии сердца зона электропозитивности на ЭПС у крыс располагается каудально, электронегативности – краниально. У крыс с МКТ-индуцированной легочной гипертензией в этот период зона положительных потенциалов занимает правую каудальную поверхность грудной клетки, зона отрицательных – всю краниальную и левую каудальную поверхность. В период максимальной электрической активности, соответствующей вершине T_{II} -волны, при достижении положительным экстремумом своего максимального значения и в период окончания реполяризации желудочков на нисходящей части T_{II} -волны зоны электронегативности и электропозитивности на ЭПС на поверхности тела не изменяются (рис.). У крыс с экспериментально вызванной ЛАГ по сравнению с исходным состоянием происходят значимые изменения амплитудно-временных параметров ЭПС на поверхности тела в период реполяризации желудочков сердца (табл.2.).

Таблица 2

Амплитудно-временные параметры ЭПС на поверхности тела крыс до и после четырех недель введения МКТ в период конечной желудочковой активности

Table 2

Amplitude-temporal parameters of cardiac electric field on the body surface of rats before and after 4 weeks of MCT administration during final ventricular activity

Параметр	Исходное состояние	После введения МКТ
Максимальное значение положительного экстремума в период комплекса ST-T, мВ	0,25 $\pm$ 0,07	0,36 $\pm$ 0,09*
Максимальное значение отрицательного экстремума в период комплекса ST-T, мВ	-0,21 $\pm$ 0,04	-0,29 $\pm$ 0,03*
Момент достижения положительным экстремумом своего максимального значения, мс	24,4 $\pm$ 2,5	24,2 $\pm$ 2,4
Момент достижения отрицательным экстремумом своего максимального значения, мс	34,5 $\pm$ 1,9	27,5 $\pm$ 2,5*

* – различия значимы по сравнению с исходным состоянием при $p \leq 0,05$

* – differences are significant compared to the initial values at $p \leq 0,05$

У крыс с МКТ, индуцированной ЛАГ, выявлено увеличение длительности QT- интервала и снижение ЧСС, что согласуется с ранее полученными данными [5]. Исследование трансмуральной дисперсии реполяризации проводят по оценке интервалов J-Tpeak, Tpeak-Tend по ЭКГ в отведениях от конечностей. Интервал J-Tpeak на ЭКГ соответствует восстановлению возбудимости эпикардиальной поверхности сердца, Tpeak-Tend – завершению реполяризации миокарда [6]. Нами выявлено достоверное удлинение Tpeak-Tend интервала и общей длительности Т-волны через четыре

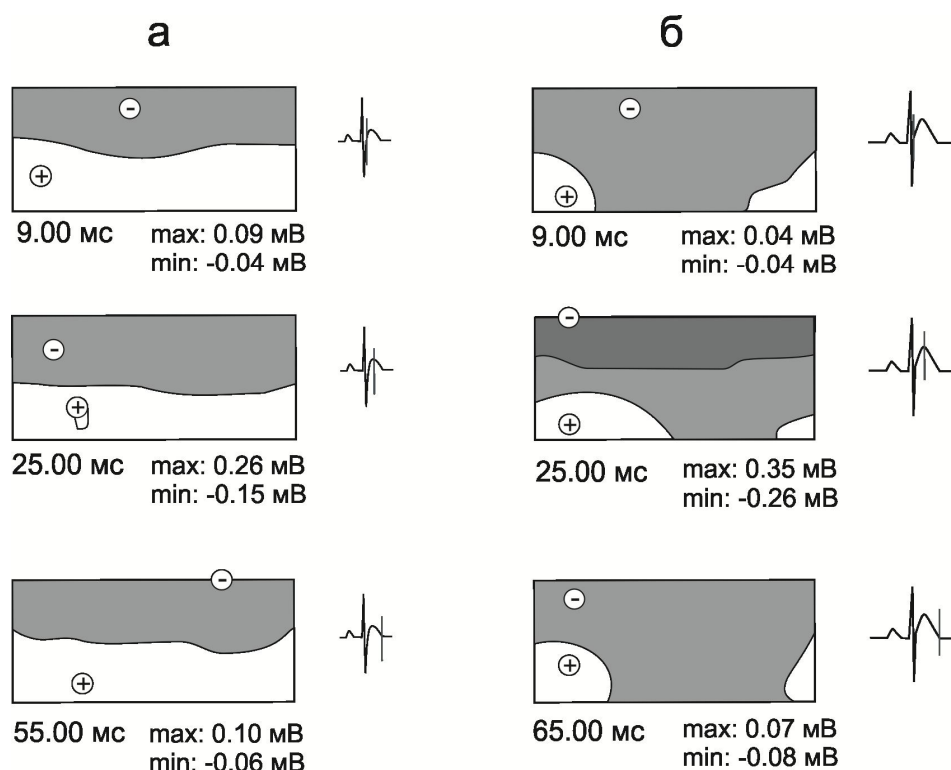


Рис. Изопотенциальные моментные карты на поверхности тела крыс в период реполяризации желудочков: а) исходное состояние; б) 4 недели после введения монокроталина.

Примечание: Закрашена область отрицательных кардиоэлектрических потенциалов, положительный – не закрашен. Рядом с каждой картой приведена ЭКГ с отметкой времени и указаны амплитуды наибольших положительных (max) и отрицательных (min) кардиопотенциалов в соответствующий момент времени. Знаками “+” и “-” обозначено местоположение положительного и отрицательного экстремумов. Шаг изолиний составлял 0,2 мВ. Левая сторона карты соответствует вентральной, правая – дорсальной поверхности грудной клетки.

Fig. Instant isopotential maps on the body surface of rats during ventricular repolarization: (a) initial state, (b) 4 weeks after the MCT injection.

Note: Shaded area corresponds to negative potentials, non-shaded – to positive ones. Each map is accompanied by the corresponding ECG with the timestamp and the extreme values (max and min) of cardiopotentials at the relevant time. The “+” and “-” signs mark the locations of the positive and negative extrema. The isopotential line spacing is 0,2 mV. The left side of the map corresponds to the ventral, the right side – to the dorsal surface of the chest.

недели после введения МКТ по сравнению с исходным состоянием. Увеличение длительности Tpeak-Tend интервала показано при синдроме удлинённого QT интервала [7] у пациентов с инфарктом миокарда [8], острой эмболии легочной артерии [9] и др. Показано, что увеличение Tpeak-Tend интервала является предиктором жизнеугрожающих аритмий [8, 10]. Ранее показано, что у крыс с МКТ-индуцированной ЛАГ увеличение конечного этапа потенциала действия вызвано снижением плотности выходящего калиевого I_{to} - тока [11], с чем может быть связано увеличение длительности конечного этапа реполяризации желудочков. Исследование амплитудно-временных параметров ЭПС на поверхности тела показало увеличение абсолютного значения амплитуды положительного и отрицательного экстремумов и меньшее время достижения отрицательным экстремумом своего максимального значения у крыс с МКТ-индуцированной ЛАГ. Сокращение времени достижения отрицательным экстремумом своего максимального значения показано при воздействии острой гипоксии

[12]. У крыс с экспериментальной легочной гипертензией через четыре недели после введения МКТ развивается гипертрофия правого желудочка сердца, вызывающая электрофизиологическое ремоделирование миокарда, которое приводит к значимому увеличению длительности реполяризации желудочков за счет ее конечного периода и достоверным изменениям амплитудно-временных параметров ЭПС на поверхности тела по сравнению с исходным состоянием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы развития УрО РАН 18-7-4-11.

Литература

1. Boggard H.J., Abe K., Vonk N.A., Voelkel N.F. The right ventricle under pressure: cellular and molecular mechanisms of right-heart failure in pulmonary hypertension // *Chest*. 2009. Vol. 135, № 3. P. 794–804.
2. Folino A.F., Bobbo F., Schiraldi C., Tona F. et al. Ventricular arrhythmias and autonomic

- profile in patients with primary pulmonary hypertension // *Lung*. 2003. Vol.181. №6. P. 321–328.
3. Antzelevitch C. Role of spatial dispersion of repolarization in inherited and acquired sudden cardiac death syndromes // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2007. Vol. 293. №4. P. H2024–H2038.
4. Суслonова О.В., Смирнова С.Л., Рощевская И.М. Кардиозлектрическое поле на поверхности тела крыс с экспериментальной легочной гипертензией в период деполяризации желудочков // *Бюл. exper. биол. и медиц.* 2016. Vol. 162. № 7. P. 11–14.
5. Benoist D., Stones R., Drinkhill M.J., Benson A.P. et al. Cardiac arrhythmia mechanisms in rats with heart failure induced by pulmonary hypertension // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2012. Vol. 302, № 11. H2381–2395.
6. Antzelevitch C. Tpeak-Tend interval as an index of transmural dispersion of repolarization // *Eur. J. Clin. Invest.* 2001. Vol. 31. №7. P. 555–557.
7. Milberg P., Reinsch N., Wasmer K., Mönnig G. et al. Transmural dispersion of repolarization as a key factor of arrhythmogenicity in a novel intact heart model of LQT3 // *Cardiovasc. Res.* 2005. Vol. 65. № 2. P. 397–404.
8. Erikssen G., Liestul K., Gullestad L., Haugaa K.H. et al. The terminal part of the QT interval (T peak to T end): A predictor of mortality after acute myocardial infarction // *Ann. Noninvasive Electrocardiol.* 2012. Vol. 17. №2. P. 85–94.
9. Icli A., Kayrak M., Akilli H., Aribas A. et al. Prognostic value of Tpeak-Tend interval in patients with acute pulmonary embolism // *B.M.C. Cardiovascular Disorders*. 2015. 15: 99. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4557924/>.
10. Castro H.J., Antzelevitch C., Tornos B.F. et al. Tpeak-Tend and Tpeak-Tend dispersion as risk factors for ventricular tachycardia/ventricular fibrillation in patients with the Brugada syndrome // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2006. Vol. 47. № 9. P. 1828–1834.
11. Lee J.K., Kodama I., Honjo H., Anno T. et al. Stage-dependent changes in membrane currents in rats with monocrotaline-induced right ventricular hypertrophy // *Am. J. Physiol.* 1997. Vol. 272, № 6(Pt. 2). H2833–H2842.
12. Пантелеева Н.И., Рощевская И.М. Электрическое поле сердца на поверхности торса у спортсменов-пловцов в период реполяризации желудочков в условиях острой нормобарической гипоксии // *Рос. физиол. журнал им. И.М. Сеченова*. 2016. Т. 102. №11. С. 1383–1392.
2. Folino A.F., Bobbo F., Schiraldi C., Tona F. et al. Ventricular arrhythmias and autonomic profile in patients with primary pulmonary hypertension // *Lung*. 2003. Vol.181, №6. P. 321–328.
3. Antzelevitch C. Role of spatial dispersion of repolarization in inherited and acquired sudden cardiac death syndromes // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2007. Vol. 293. № 4. P. H2024–H2038.
4. Suslonova O.V., Smirnova S.L., Roshchevskaya I.M. Kardioelektricheskoe pole na poverhnosti tela krysa s ehksperimental'noj legochnoj gipertenziej v period depolyarizacii zheludochkov [Cardiac electric field on the body surface of rats with experimental pulmonary hypertension during ventricular depolarization] // *Bull. of exper. biology and medicine*. 2016. Vol. 162. № 7. P. 11–14.
5. Benoist D., Stones R., Drinkhill M.J., Benson A.P. et al. Cardiac arrhythmia mechanisms in rats with heart failure induced by pulmonary hypertension // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2012. Vol. 302. № 11. H2381–2395.
6. Antzelevitch C. Tpeak-Tend interval as an index of transmural dispersion of repolarization // *Eur. J. Clin. Invest.* 2001. Vol. 31. №7. P. 555–557.
7. Milberg P., Reinsch N., Wasmer K., Mönnig G. et al. Transmural dispersion of repolarization as a key factor of arrhythmogenicity in a novel intact heart model of LQT3 // *Cardiovasc. Res.* 2005. Vol. 65. № 2. P. 397–404.
8. Erikssen G., Liestul K., Gullestad L., Haugaa K.H. et al. The terminal part of the QT interval (T peak to T end): A predictor of mortality after acute myocardial infarction // *Ann. Noninvasive Electrocardiol.* 2012. Vol. 17. №2. P. 85–94.
9. Icli A., Kayrak M., Akilli H., Aribas A. et al. Prognostic value of Tpeak-Tend interval in patients with acute pulmonary embolism // *B.M.C. Cardiovascular Disorders*. 2015. 15: 99. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4557924/>.
10. Castro H.J., Antzelevitch C., Tornos B.F. et al. Tpeak-Tend and Tpeak-Tend dispersion as risk factors for ventricular tachycardia/ventricular fibrillation in patients with the Brugada syndrome // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2006. Vol. 47. № 9. P. 1828–1834.
11. Lee J.K., Kodama I., Honjo H., Anno T. et al. Stage-dependent changes in membrane currents in rats with monocrotaline-induced right ventricular hypertrophy // *Am. J. Physiol.* 1997. Vol. 272, № 6(Pt. 2). H2833–H2842.
12. Panteleeva N.I., Roshchevskaya I.M. Elektricheskoe pole serdca na poverhnosti torasa u sportsmenov-plovcov v period repolyarizacii zheludochkov v usloviyah ostroj normobaricheskoj gipoksii [Cardiac electric field on the torso surface of sportsmen-swimmers during ventricular repolarization under acute normobaric hypoxia] // *Rossiiskij fiziologicheskij zhurnal im. I.M. Sechenova [Russian J. of Physiology]*. 2016. Vol. 102. №11. P. 1383–1392.

References

Статья поступила в редакцию 16.05.2018.

УДК 612.172.4

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-70-74

КАРДИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА СВИНЬИ В ПЕРИОД НАЧАЛЬНОЙ И КОНЕЧНОЙ ЖЕЛУДОЧКОВОЙ АКТИВНОСТИ

В.А. КУЩ, А.С. ГУЛЯЕВА

ВНЭБС – филиал ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

kushch.v@bk.ru

В статье представлены результаты по исследованию методом электрокардиотопографии кардиоэлектрического поля на поверхности тела трехмесячных свиней в период деполяризации и реполяризации желудочков сердца. В распределении кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела животных наблюдаются межвидовые отличия.

Ключевые слова: свинья, кардиоэлектрическое поле, положительный и отрицательный экстремумы, деполяризация и реполяризация желудочков

V.A. KUSHCH, A.S. GULYAEVA. CARDIOELECTRIC FIELD ON THE BODY SURFACE OF PIG DURING INITIAL AND FINAL VENTRICULAR ACTIVITY

The cardioelectric field on the body surface of three-month-old pigs has been studied during ventricular depolarization and repolarization by the method of electrocardiotopography. The results indicated that during ventricular depolarization the electric field on the body surface in pig is formed before the beginning of the ascending part of the R-wave relative to the S_{II} -peak with the cranial location of areas of positive cardiopotentials and with the caudal location of areas of negative cardiopotentials. The first inversion of areas of positive and negative cardioelectric potentials occurs during the period of the descending part of the R-wave, the second inversion of cardiopotentials begins on the ascending part of the S-wave. During ventricular repolarization the zone of negative cardiopotentials occupies ventral and dorsal sides of the body surface; the zone of a positive potential is situated medially on the ventral part of the thorax. The zones of positive and negative cardiopotentials do not change their position during the whole period of repolarization.

Interspecific differences (sheep, dog) are shown in the distribution of cardioelectric potentials on animals' body surface during ventricular depolarization and repolarization.

Keywords: cardioelectric field, positive and negative extrema, depolarization, repolarization, ventricles, pig

Формирование электрического поля сердца (ЭПС) на поверхности тела отражает процесс распространения волны возбуждения и восстановления возбудимости миокарда. Сравнительные исследования позволили выявить закономерности формирования ЭПС у теплокровных животных и человека в период деполяризации и реполяризации желудочков [1].

В качестве модельных животных при изучении различных патологических состояний миокарда, таких как ишемия, инсульт, инфаркт, используют грызунов, хищных и копытных животных [2–4]. Исследование патологий сердечно-сосудистой системы, в основе которых лежит гипоксия, актуально изучать на свиньях [5–7]. Детально исследована последовательность интрамуральной деполяризации миокарда

желудочков свиней: выявлены области начальной и конечной желудочковой активности, области множественной деполяризации [8]. Процесс деполяризации и реполяризации миокарда непосредственно отражается в формировании ЭПС на поверхности тела. Цель работы – изучить кардиоэлектрическое поле на поверхности тела свиньи в период деполяризации и реполяризации желудочков.

Материал и методы исследования

Исследование кардиоэлектрического поля на поверхности тела проводили у беспородных свиней ($n=10$) в возрасте трех месяцев, массой 22–27 кг. Животных анестезировали 1%-ным раствором вен-транквила (0,02 мл/кг, в/м) и уретаном (1,5 г/кг, в/м).

Во время эксперимента состояние свиней контролировали с помощью ветеринарного монитора Dixon Storm 5770 VET (DIXION, Россия). Униполярные кардиоэлектрические потенциалы регистрировали методом синхронной многоканальной кардиоэлектротопографии у животных от 64 подкожных игольчатых электродов, равномерно распределенных от основания шеи до последнего ребра в положении лежа на спине (рис. 1).

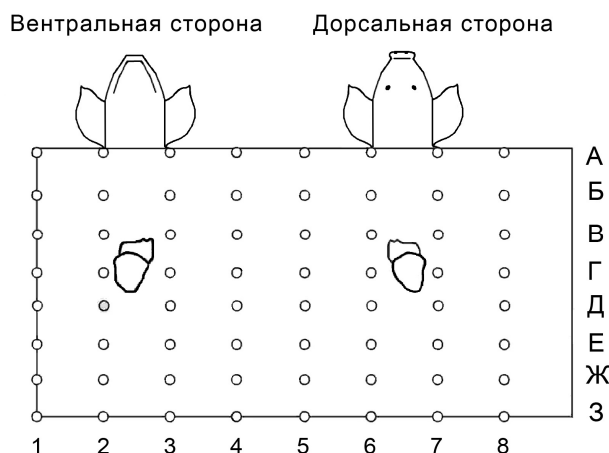


Рис. 1. Схема расположения электродов на плоскости (развернутая поверхность грудной клетки), соответствующая формату эквипотенциальной моментной карты.

Условные обозначения: 1–8 – распределение электродов в каудально-краниальном направлении; А–З – расположение точек отведения в ряду.

Fig.1. The scheme of electrode arrangement on the plane (unrolled thorax surface) corresponding to the format of the equipotential momentous map.

Symbols: numbers 1-8 indicate the distribution of electrodes in the caudal-cranial direction; letters A-Z represent the location of the lead points in a line.

Синхронно с кардиоэлектрическими потенциалами на поверхности тела регистрировали ЭКГ в сагиттальных биполярных отведениях по М.П.Рощевскому [9]. Отсчет моментов времени в мс проводили относительно пика зубца S_{II} до S_{II} -пика. Момент времени указывается со знаком минус. По моментным эквипотенциальным картам анализировали динамику электрического поля сердца на поверхности тела животных. ЧСС наркотизированных свиней составляла 143 ± 30 уд/мин. Результаты представлены в виде средней арифметической $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$).

Результаты и обсуждение

Период деполяризации желудочков. Электрическое поле сердца на поверхности тела свиньи в период деполяризации желудочков (рис. 2) начинает формироваться на -38 ± 6 мс относительно S_{II} -пика до начала восходящей части R-зубца с краниальным расположением области положительных потенциалов на вентральной и дорсальной сторон, отрицательных – каудально.

К -13 ± 4 мс, что соответствует пику R-зубца на ЭКГ S_{II} , области положительных и отрицательных по-

тенциалов начинают равномерно занимать краниальную и каудальную части грудной клетки соответственно. В период нисходящей части R-зубца (-10 ± 3 мс) на ЭПС происходит инверсия кардиопотенциалов на поверхности тела и к пику зубца S_{II} область положительных потенциалов смещается в каудальную часть вентральной и дорсальной сторон поверхности тела, отрицательных – краниально.

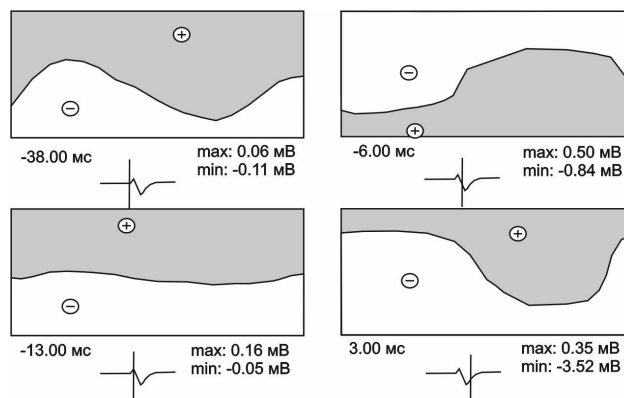


Рис. 2. Эквипотенциальные моментные карты на поверхности тела свиньи в период начальной желудочковой активности.

Условные обозначения: закрашены области положительных кардиопотенциалов, не закрашены – отрицательных. Знаки «+» и «-» обозначают местоположение максимальных положительного и отрицательного экстремумов, соответственно. Левая половина каждой карты соответствует вентральной стороне тела, правая – дорсальной. Под картой указано время в мс относительно пика зубца S_{II} , приведена ЭКГ S_{II} с маркером времени (вертикальная черта), указаны максимальная амплитуда положительного (max) и отрицательного (min) экстремумов кардиоэлектрического поля (мВ).

Fig.2. Equipotential momentous maps on the pig's body surface during initial ventricular activity.

Symbols: areas of positive cardiopotentials are painted, areas of negative ones – unpainted. The signs «+» and «-» indicate the location of the maximum positive and negative extrema, respectively. The left half of each map corresponds to the ventral side of the body, the right – to the dorsal one. The time (ms) relative to the S_{II} -peak, ECGs S_{II} with the time marker (vertical line), the maximum amplitude of the positive (max) and negative (min) extrema of the cardioelectric field (mV) are given under the map.

На восходящей части S-зубца (3 ± 1 мс) начинается вторая инверсия кардиопотенциалов, область положительных потенциалов смещается краниально и занимает большую часть дорсальной стороны, а отрицательных каудально на вентральной части грудной клетки. К 34 ± 8 мс на поверхности тела наблюдается хаотичное расположение отрицательных и положительных потенциалов.

Траектория движения положительного и отрицательного экстремумов на поверхности тела свиньи период деполяризации желудочков повторяет смещение областей положительных и отрицательных кардиопотенциалов в первую и вторую

инверсии. Отрицательный экстремум достигает своего максимального значения $-3,09 \pm 0,76$ мВ на $-0,8 \pm 3,96$ мс относительно S_{II} -пика, а положительный экстремум $0,83 \pm 0,3$ мВ на $-2,1 \pm 4,95$ мс.

Период реполяризации желудочков. Распределение потенциалов электрического поля сердца на поверхности тела, характерное для периода реполяризации желудочков, формируется во время ST_{II} интервала на 165 ± 21 мс относительно S_{II} -пика (рис. 3), T -волна на ЭКГ $_{SII}$ начинается на 169 ± 38 мс, после S_{II} -пика заканчивается на 249 ± 41 мс.

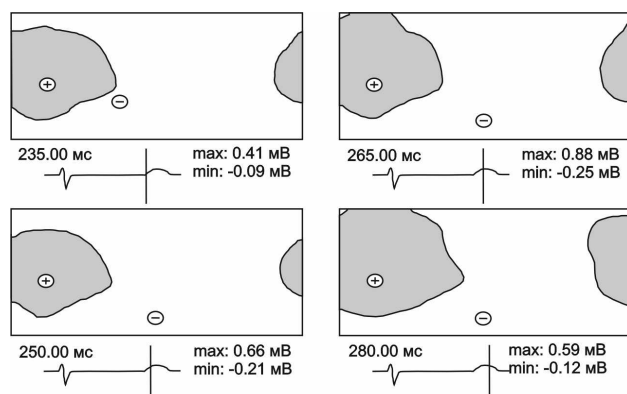


Рис.3. Эквипотенциальные моментные карты на поверхности тела свиньи в период конечной желудочковой активности.

Условные обозначения те же, что и на рис. 2.

Fig.3. Equipotential momentous maps on the pig's body surface during final ventricular activity. Symbols are the same as in Fig. 2

В период реполяризации желудочков сердца на ЭПС на поверхности грудной клетки свиньи зона отрицательного потенциала занимает вентральную и дорсальную стороны, а зона положительного потенциала расположена медиально на вентральной части грудной клетки и занимает примерно 2/3 поверхности. В течение всего периода реполяризации зоны положительных и отрицательных кардиопотенциалов сохраняют свое расположение. Область положительных потенциалов к 280 мс относительно зубца S_{II} увеличивается в размере и занимает краниальную и медиальную части вентральной поверхности.

Положительный и отрицательный экстремумы на поверхности тела в период реполяризации желудочков расположены преимущественно на вентральной поверхности и не меняют своего расположения в течение периода восстановления. Амплитуды положительного и отрицательного экстремумов увеличиваются в течение восходящей фазы T_{II} -волны и достигают своего максимума до её вершины к 211 ± 38 мс, на 249 ± 41 мс к концу T -волны на ЭКГ $_{SII}$ наблюдается уменьшение амплитуд положительных и отрицательных потенциалов. Экстремумы достигают своего максимального значения: отрицательный $-0,37 \pm 0,13$ мВ на 251 ± 31 мс относительно S_{II} -пика, а положительный экстремум $-1,46 \pm 0,51$ мВ на 246 ± 16 мс.

У наркотизированных свиней ЧСС составляет от 91 до 167 уд/мин [10] и от 92 до 184 уд/мин

[11]. Согласно нашим данным, ЧСС у свиней во время эксперимента составляла 143 ± 30 уд/мин.

Позвоночные животные имеют разные типы последовательности деполяризации желудочков сердца. Хищные животные (собаки) характеризуются «вспышечно-последовательным» типом активации миокарда, а копытные (овцы, свиньи) – «вспышечным» [1, 9]. Показано, что на поверхности тела собаки в период начальной желудочковой активности формируется кардиоэлектрическое поле с краниальной зоной положительных потенциалов и каудальной зоной отрицательных потенциалов. На краниальной поверхности туловища овцы формируется зона отрицательных потенциалов, на каудальной поверхности – зона положительных [1]. Согласно нашим данным, у свиньи область положительных потенциалов формируется краниально, а область отрицательных потенциалов – каудально. На начальных этапах деполяризации желудочков электрическая активность первичных эндокардиальных и интрамуральных очагов возбуждения у собаки и свиньи одинаково отражается на кардиоэлектрическом поле формированием зоны положительных и отрицательных потенциалов, расположенных соответственно краниально и каудально, в отличие от овцы.

Выявлено, что у собак [12] в период времени, соответствующий прорыву волны возбуждения на субэпикард правого желудочка сердца, на поверхности тела происходит первая инверсия областей положительных и отрицательных кардиоэлектрических потенциалов. На ЭКГ этот период соответствует восходящей фазе зубца R . У овец прорыв волны возбуждения на субэпикард, возникновение множественных очагов ранней деполяризации в желудочках сердца не приводят к возникновению инверсии кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела [1]. При исследовании закономерностей деполяризации желудочков сердца свиней [8] было показано, что время начала активации субэпикардиальной поверхности желудочков и появление множественных очагов деполяризации соответствуют данным, полученным ранее по овцам. В результате на восходящей фазе R -зубца на ЭКГ $_{SII}$ нами также не наблюдалась инверсия кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела свиньи.

При анализе динамики кардиоэлектрического поля на поверхности тела свиньи выявлено, что первая инверсия областей положительных и отрицательных кардиоэлектрических потенциалов начинается на нисходящей фазе R -зубца и заканчивается к пику зубца S на ЭКГ $_{SII}$. У овец инверсия зон положительного и отрицательного потенциалов на поверхности тела происходит во время нисходящей фазы S -зубца на ЭКГ $_{SII}$ [1]. Инверсия кардиоэлектрических потенциалов наблюдается после того как распространение волны возбуждения от множественных очагов начальной активации приводит к быстрой деполяризации основной массы желудочков сердца. Основное направление деполяризации в этот период – от верхушки сердца к его основанию. У свиньи инверсия потенциалов на поверхности тела наблюдается раньше, чем у ов-

цы. Возможно, это связано с тем, что основная масса миокарда желудочков сердца свиньи начинает деполяризовываться раньше и быстрее за 20–25 мс, а у овцы – за 25–30 мс [1].

Время первой инверсии областей положительного и отрицательного кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела собаки соответствует восходящей фазе зубца *R*. Инверсия наблюдается в период времени от начала активации желудочков до прорыва волны возбуждения на субэпикард. Вторая инверсия взаимного расположения зон положительного и отрицательного кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела собак [12] отмечается после того, как основная масса желудочков деполяризована, и волна возбуждения направляется к основанию левого желудочка и конусу аорты.

На ЭКГ этот период соответствует нисходящей фазе *R*-зубца. Согласно нашим исследованиям, у свиньи вторая инверсия кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела начинается на восходящей части зубца *S*. По времени это соответствует конечному этапу деполяризации субэпикарда дорсальной и латеральной стенок основания левого желудочка сердца свиньи [8]. У овец на конечных этапах деполяризации желудочков сердца на поверхности тела сохраняется краниальное расположение области положительного потенциала и каудальное – отрицательного, наличие второй инверсии кардиопотенциалов не выявлено [1].

Наблюдаются различия в расположении зон положительных и отрицательных кардиопотенциалов на поверхности тела свиней в период конечной желудочковой активности по сравнению с собакой и овцой. У свиньи зона отрицательного потенциала занимает большую поверхность грудной клетки, а область положительного расположена медиально на вентральной ее части. Анализ кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела овцы и собаки в период реполяризации желудочков показал, что зоны отрицательных потенциалов расположены на краниальной поверхности туловища, а положительных – на каудальной [1].

Таким образом, на поверхности тела свиньи и собаки в период деполяризации желудочков наблюдается однотипное расположение зон положительных и отрицательных кардиопотенциалов. В период конечной желудочковой активности выявлены существенные различия в расположении зон положительных и отрицательных кардиопотенциалов на поверхности тела свиней по сравнению с собакой и овцой.

На кардиоэлектрическом поле поверхности тела свиньи и собаки в период деполяризации наблюдаются две инверсии взаимного расположения областей, различающиеся по времени возникновения. Первая инверсия у собаки происходит до начала зубца *R* на ЭКГ у свиньи и в нисходящую фазу зубца *S* – у овцы. Вторая инверсия у собаки и у свиньи совпадают по времени возникновения на кардиоэлектрическом поле поверхности тела.

Заключение

В формировании кардиоэлектрического поля на поверхности тела свиньи в период начальной и конечной желудочковой активности выявлены отличия по сравнению с собакой и овцой. Их обуславливают следующие факторы: формирование зон начальной активации в интрамуральных слоях, распространение волны возбуждения в желудочках, восстановление возбудимости, ориентация и расположение сердца в грудной клетке. Показаны межвидовые отличия в распределении кардиоэлектрических потенциалов на поверхности тела животных в период деполяризации и реполяризации желудочков сердца.

Литература

1. *Рощевская И.М.* Кардиоэлектрическое поле теплокровных животных и человека. СПб.: Наука, 2008. 250 с.
2. *Evans D.L.* Cardiac responses to exercise and training // *Cardiology of the Horse*. W B Saunders, London, 1999. P. 32–46.
3. *Hasenfuss G.* Animal models of human cardiovascular disease, heart failure and hypertrophy. *Cardiovasc. Res.* 39(1) : 60–76. 1998.
4. *The role of histamine in acute hypoxic pulmonary hypertension in dogs/A.P.Zou, D.X.Wang, C.J.Feng, D.P.Li, X.L.Tian, G.T.Yang, Q.L.Chen, F.Wu* // *Acta Acad. Med. Wuhan*. 1984. Vol.4. № 1. P. 50–55.
5. *Куц В.А., Гуляева А.С., Рощевская И.М.* Электрокардиограмма свиней при острой нормобарической гипоксии // *Вестник ветеринарии*. 2013. Вып. 65(2). С. 22–25.
6. *Тихонов В.Н., Ларионов П.М., Тихонов А.В.* Использование мини-свиней в качестве модели для разработки новых методов лечения ишемической болезни сердца // *Атеросклероз*. 2010. Т. 6. № 2. С. 28–39.
7. *Шустов Е.Б., Капанадзе Г.Д., Каркищенко В.Н. и др.* Изменение параметров сердечной деятельности по данным ЭКГ у мини-свиней в условиях стресс-индуцированной тахикардии // *Биомедицина*. 2013. Т.1. №4. С. 126–133.
8. *Гуляева А.С., Рощевская И.М., Рощевский М.П.* Интрамуральная хронотопография деполяризации миокарда желудочков сердца свиньи (*Sus scrofa domestica*) // *Журнал эволюционной биологии и физиологии*. 2014. Вып. 50(2). С. 97–101.
9. *Рощевский М.П.* Избранные труды. Том II. Эволюционная электрокардиология и северная экофизиология. 1955 – 1979. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2013. С. 95.
10. *Bharati S., Levine M., Huang SK, Handler B, et al.* The conduction system of the swine heart. *Chest* 1991; 100:207–212.
11. *Смирнова С.Л., Коломеец Н.Л., Рощевский М.П., Рощевская И.М.* Формирование областей начальной предсердной активности на эпикарде предсердий копытных животных с разной частотой сердечных сокращений // *Ветеринарная медицина*. 2010. №3–4. 89–91с.
12. *Сопоставление по времени начальных моментов активации миокарда желудочков и параметров кардиоэлектрического поля на*

поверхности тела собаки/В.А.Витязев, С.Н.Харин, Я.Э.Азаров, К.К.Мостивенко, Н.А.Антонова, И.М.Роцевская, Д.Н.Шмаков, М.П.Роцевский // Бюл. эксперим. биол. и мед. 2001. Вып. 131(4). С. 338–391.

References

1. *Roshchevskaya I.M.* Kardioelektricheskoe pole teplokrovnyh zhivotnyh i cheloveka. [Cardioelectric field of warm-blooded animals and humans]. St.Petersburg: Nauka, 2008. 250 p.
2. *Evans D.L* Cardiac responses to exercise and training // *Cardiology of the Horse*. W B Saunders, London, 1999. P. 32-46.
3. *Hasenfuss G.* Animal models of human cardiovascular disease, heart failure and hypertrophy. *Cardiovasc. Res.* 39(1): 60–76. 1998.
4. *The role of histamine* in acute hypoxic pulmonary hypertension in dogs / A.P. Zou, D.X. Wang, C.J. Feng, D.P. Li, X.L. Tian, G.T. Yang, Q.L. Chen, F. Wu // *Acta Acad. Med. Wuhan*. 1984. Vol. 4. No. 1. P. 50–55.
5. *Kushch V.A., Gulyaeva A.S., Roshchevskaya I.M.* Elektrokardiogramma svinej pri ostroj normobaricheskoj gipoksii [Electrocardiogram of pigs at acute normobaric hypoxia] // *J. of Veterinary Medicine*. 2013. Issue 65(2). P. 22–25.
6. *Tikhonov V.N., Larionov P.M., Tikhonov A.V.* Ispol'zovanie mini-svinej v kachestve modeli dlja razrabotki novyh metodov lechenija ishemičeskoj bolezni serdca [The use of mini-pigs as a model for the development of new methods of ischemic heart disease (IHD) treatment] // *Atherosclerosis*. 2010. Vol. 6. № 2. P. 28–39.
7. *Shustov E.B., Kapanadze G.D., Karkishchenko V.N. et al.* Izmenenie parametrov serdečnoj dejatel'nosti po dannym JeKG u mini-svinej v uslovijah stress-inducirovannoj tahikardii [Change of parameters of cardiac activity in the ECG in mini-pigs at stress-induced tachycardia] // *Biomedicine*. 2013. Vol. 1. № 4. P. 126–133.
8. *Gulyaeva A.S., Roshchevskaya I.M., Roshchevsky M.P.* Intramural'naja hronotopografiya depoljarizacii miokarda zheludochkov serdca svin'i (Susscrofademesticus) [Intramural chronotopography of the ventricular myocardium depolarization in pig (Susscrofademesticus)] // *J. of Evol. Biochem. and Physiol.* 2014. Issue 50(2). P. 97-101.
9. *Roshchevsky M.P.* Izbrannye trudy. Tom II. Evoljucionnaja jelektrokardiologija i severnaja jekofiziologija [Selected Works. Vol. 2. Evolutionary Electrocardiology and Northern Ecophysiology]. 1955 – 1979. Syktyvkar: Komi Sci. Centre, Ural Br., RAS, 2013. P. 95.
10. *Bharati S., Levine M., Huang SK, Handler B. et al.* The conduction system of the swine heart. *Chest* 1991; 100:207-212.
11. *Smirnova S.L., Kolomeets N.L., Roshchevsky M.P., Roshchevskaya I.M.* Formirovanie oblastej nachal'noj predserdnoj aktivnosti na jepikarde predserdij kopytnyh zhivotnyh s raznoj chastotoj serdečnyh sokrashhenij [Formation of areas of initial atrial activity on the atrial epicardium of ungulates with different heart rate] // *Veterinary Medicine*, 2010, №3–4. 89–91 p.
12. *Sopostavlenie po vremeni nachal'nyh momentov aktivacii miokarda zheludochkov i parametrov kardioelektricheskogo polja na poverhnosti tela sobaki* [Time correlation between initial activation of the ventricular myocardium and cardioelectric field parameters on the body surface in dogs] / V.A. Vitязev, S.N. Kharin, Ya.E. Azarov, K.K. Mostivenko, N.A. Antonova, I.M. Roshchevskaya, D.N. Shmakov, M.P. Roshchevsky // *Bull. of Experim. Biol. and Medicine*. 2001. Issue 131(4). P. 338–391.

Статья поступила в редакцию 09.07.2018.

УДК 552.163;552.24 (234.851)
DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-75-82

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ВЕРХНЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

Н.С. УЛЯШЕВА

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
nsulasheva@geo.komisc.ru

Изучение углеродсодержащих пород верхнепротерозойских отложений Центрально-Полярноуральской тектонической зоны показало, что в няровейской серии они представлены эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитовыми терригенными, хлорит-мусковит-кварцевыми, мусковит-кварцевыми терригенно-кремнистыми низкоуглеродистыми и углеродистыми черными сланцами, а в немурюганской свите – кварц-карбонатными низкоуглеродистыми черными сланцами. В них основным источником редкоземельных элементов, U и Th является терригенный материал. Терригенные черные сланцы западной зоны распространения няровейской серии, по-видимому, выполняют ресурсную функцию в урановом рудообразовании (U до 110 г/т), а терригенно-кремнистые черные сланцы восточной зоны – барьерную функцию в формировании аномально высоких накоплений эндогенного золота (Au до 2,6 г/т).

Ключевые слова: черные сланцы, няровейская серия, немурюганская свита, уран, золото

N.S. ULYASHEVA. PETROGRAPHIC AND GEOCHEMICAL PECULIARITIES OF CARBONACEOUS ROCKS OF THE UPPER PROTEROZOIC DEPOSITS OF THE POLAR URALS

Black shales attract the attention of geologists due to the increased content of gold, nonferrous metals and rare earth elements. In the Central Polar Urals tectonic zone the carbonaceous rocks are distributed in the Upper Riphean deposits of the Nyarovei series and the Nemuryugan suite. According to the works of predecessors, they are characterized by superclarks content of silver, zinc, lead, vanadium, phosphorus and platinoids, and their study is of great practical interest. The typification of carbonaceous rocks of the Nyarovei series and the Nemuryugan suite by petrographic and geochemical criteria was carried out. The study of carbonaceous rocks of the Upper Proterozoic deposits of the Central Polar Urals tectonic zone showed that in the Nyarovei series they are represented by epidote-albite-chlorite-quartz-sericite terrigenous, chlorite-muscovite-quartz, muscovite-quartz terrigenous-siliceous low-carbon and carbonaceous black shales, in the Nemuryugan suite - by quartz-carbonate low-carbon black shales. The main source of rare-earth elements, U and Th, is terrigenous material. The terrigenous black shales of the western zone of the Nyarovei series appear to fulfill a resource function in the uranium ore formation (U up to 110 ppm), while the terrigenous-siliceous black shales of the eastern zone - a barrier function in the formation of abnormally high accumulations of endogenous gold (Au up to 2,6 ppm).

Keywords: black shales, Nyarovei series, Nemuryugan suite, uranium, gold

Черные сланцы привлекают внимание геологов благодаря повышенному содержанию в них золота, цветных металлов и редкоземельных элементов. В Центрально-Полярноуральской тектонической зоне углеродсодержащие породы распространены в разрезах верхнерифейских отложений [1] няровейской серии и немурюганской свиты, слагаю-

щих крылья Харбейского антиклинория. По данным предшественников, они характеризуются надкларковыми значениями серебра, цинка, свинца, ванадия, фосфора и платиноидов, и их изучение представляет большой практический интерес [2].

В работе проведена типизация углеродсодержащих пород няровейской серии и немурюганской

свиты по петрографическим и геохимическим критериям: минеральному составу, формационной принадлежности и способам накопления элементов-примесей, в том числе и благородных металлов.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются углерод-содержащие породы верхнепротерозойских отложений Полярного Урала, отобранных по ручьям Нярошор, Графитовый, Ингилоръеган, Немуръеган. Изучение их минерального состава проводилось под микроскопом в шлифах. Содержания петрохимических компонентов углеродистых сланцев получены методом мокрой химии и комплексного метода мокрой химии и рентгенофлуоресцентного анализа в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН в ЦКП «Геонаука». Содержания благородных металлов, редких и редкоземельных элементов определялись при кислотном разложении исходных образцов и дальнейшего анализа с помощью сектор-

ного масс-спектрометра с ионизацией в индуктивно связанной плазме (FS HR ICP-MS) Element2 в Институте геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого (Екатеринбург), а также на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7700 (ICP-MS) в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН.

Геологическая позиция

Няровейская серия верхнего рифея слагает крылья Харбейского антиклинория и образует две зоны распространения: с запада и востока обрамляет харбейский и марункеуский раннепротерозойские комплексы [3]. Серия снизу вверх подразделяется на нижнюю – верхнехарбейскую и верхнюю – минисейшорскую свиты (рис. 1).

Верхнехарбейская свита мощностью 400–500 м сложена метаморфизованными терригенно-осадочными отложениями – слюдяно-кварц-полевошпатовыми кварцитопесчаниками и гравелитами с подчинёнными пластами и пачками хлорит-слюдяно-кварц-

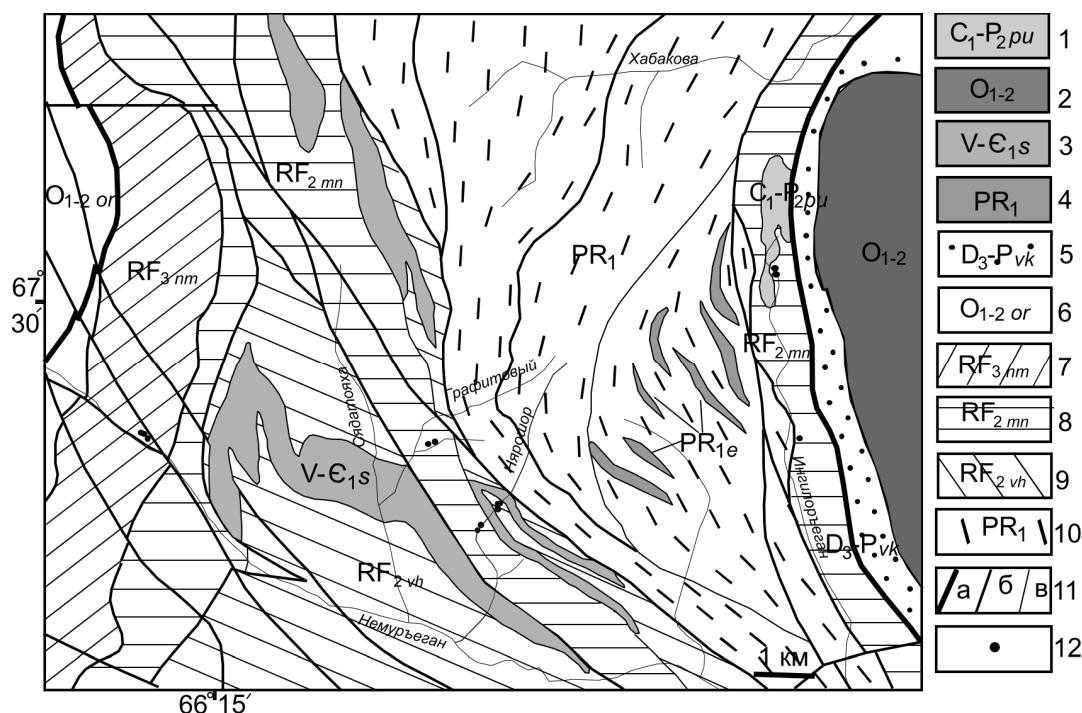


Рис. 1. Схематическая геологическая карта бассейна р. Немуръеган (по [2]). Условные обозначения: 1 – Полярноуральский комплекс гранитовый полихронный плутонический; 2 – Сыумкеуский комплекс дунит-гарцбургитовый плутонический; 3 – Сыдатояхинский комплекс гранитовый плутонический; 4 – Евьюганский комплекс мигматит-плагитогранитовый; 5 – Войкаро-кемпирсайский комплекс тектонитов; 6 – орангская свита: сланцы, алевролиты, песчаники; 7 – немурюганская свита: парасланцы, метаэффузивы, туфы; 8 – минисейшорская свита: сланцы, metabasalts; 9 – верхнехарбейская свита: сланцы, кварцитопесчаники, мрамора; 10 – марункеуский комплекс: амфиболиты, эклогиты, гнейсы; 11 – геологические границы: а – главные надвиги, б – второстепенные тектонические нарушения, в – между разновозрастными образованиями; 12 – места отбора проб.

Fig. 1. Schematic geological map of the basin of the river Nemuryegan (according to [2]). Legend: 1 – granite polychronous plutonic complex of Polar Urals, 2 – Syumke dunite-harzburgitic plutonic complex, 3 – Sydatoyakha granite plutonic complex, 4 – Evyugan migmatite-plagiogranites complex, 5 – Voykaro-Kempirsai tectonite complex, 6 – Orang suite: shales, siltstones, sandstones, 7 – Nemuryugan suite: paraslants, metaeffusive, tuffs, 8 – Miniseyshor suite: shales, metabasalts, 9 – Upperkharbey suite: shales, quartzite sandstone, gneiss, 10 – Marunkeu complex: amphibolite, eclogite, gneiss, 11 – geological boundaries: a – main thrust faults, b – minor tectonic disturbances, v – between uneven-aged formations, 12 – sampling sites.

альбитовых, хлорит-серицит-альбит-кварцевых, графитоидных сланцев. Нижняя граница проводится по основанию горизонта конгломератов.

Минисейшорская свита представлена метабазальтами, филлитовидными, эпидот-хлорит-амфиболовыми, эпидот-альбит-хлоритовыми сланцами с подчинённым развитием углеродистых и карбонатных разностей. Верхняя граница свиты проводится по исчезновению из разреза филлитовидных сланцев и появлению зеленых парасланцев немурюганской свиты. Мощность свиты 1200–1400 м.

Немурюганская свита мощностью 800–1500 м верхнего рифея согласно залегает на минисейшорской свите няровейской серии и наблюдается в западной области Центрально-Полярноуральской тек-тонической зоны. В пределах немурюганской свиты широко распространены филлитовидные, часто углеродистые серицит-кварцевые, серицит-биотит-кварцевые хлорит-серицит-кварцевые сланцы, карбонатные породы, кварциты, аркозовые кварцито-песчаники, метаморфизованные основные эффузивы и их туфы [2].

Верхнепротерозойские отложения имеют северо-северную ориентировку структурных элементов и претерпели метаморфизм в условиях зеленосланцевой фации [4].

Результаты и обсуждение

Петрографические и петрохимические особенности. Углеродсодержащие сланцы были изучены в западной и восточной зонах распространения няровейской серии, а также в отложениях немурюганской свиты. Они образуют толщи мощностями от нескольких сантиметров до десятков метров и представлены плитчатыми образованиями черной окраски разной плотности. Углеродсодержащие породы верхнехарбейской свиты няровейской серии имеют хлорит-мусковит-кварцевый состав и являются низкоуглеродистыми и углеродистыми черными сланцами с содержанием $C_{орг}$ – 1,01–4,03% (табл. 1). В вышележащей минисейшорской свите распространены эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитовые, мусковит-кварцевые и хлорит-мусковит-кварцевые низкоуглеродистые и углеродистые черные сланцы ($C_{орг}$ – 0,74–4,11 %). Углеродистые кварциты этой свиты имеют низкие количества $C_{орг}$ – 0,25–0,35 %.

В немурюганской свите углеродсодержащие породы были обнаружены в делювии по левобережью р. Немурьеган. Они представлены низкоуглеродистыми кварц-карбонатными черными сланцами ($C_{орг}$ – 0,80–1,11 %). Углеродистое вещество в изучаемых породах встречается в виде пылевидной тонкорассеянной формы, образует линзовидные, полосовидные, струйчатые выделения и представлено нанокристаллическим графитом [5].

Для определения состава протолита и фациальной принадлежности углеродсодержащих пород использована диаграмма A-S-C [6], на которой точка состава эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитового черного сланца минисейшорской свиты с высоким содержанием глинозема и низким – кремнезема приурочена к области пород терригенно-

углеродистой формации, а точка состава углеродистого кварцита верхнехарбейской свиты тяготеет к правой зоне кремнисто-углеродистой области (табл. 1, рис. 2). Точки составов мусковит-кварцевых и хлорит-мусковит-кварцевых образований няровейской серии занимают область между вышеуказанными точками и располагаются в левой части поля кремнисто-углеродистой формации, что, вероятно, указывает на формирование их по кремнистым породам с примесью терригенного материала. Кварц-карбонатные черные сланцы немурюганской свиты близки по составу к породам карбонатно-углеродистой формации.

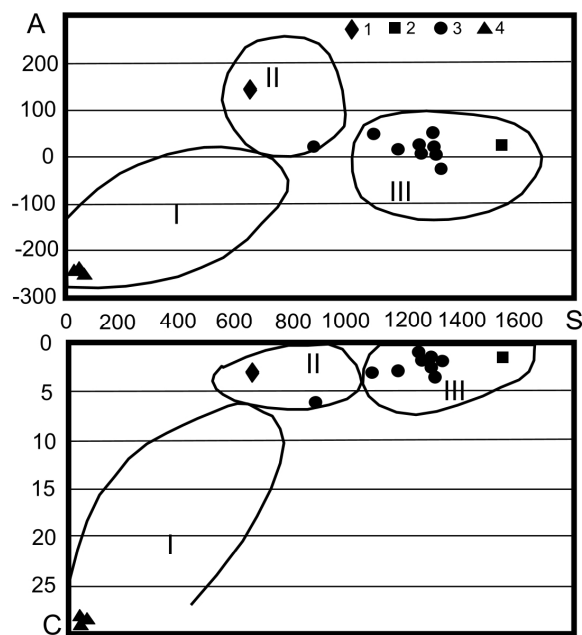


Рис. 2. Точки составов верхнепротерозойских углеродсодержащих пород Полярного Урала на диаграмме A-S-C [6], ($A = (Al_2O_3 - (CaO + K_2O + Na_2O)) \cdot 1000$, $S = (SiO_2 - (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + CaO + MgO)) \cdot 1000$ мол. кол., $C = CaO + MgO$ масс. %). Точки составов углеродсодержащих сланцев: 1 – эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитового черного сланца минисейшорской свиты няровейской серии; 2 – углеродистого мусковит-кварцевого сланца (кварцита) верхнехарбейской свиты няровейской серии; 3 – мусковит-кварцевых и хлорит-мусковит-кварцевых черных сланцев верхнехарбейской и минисейшорской свит няровейской серии; 4 – кварц-карбонатных черных сланцев немурюганской свиты.

Fig. 2. The points of the compositions of the Upper Proterozoic carbonaceous rocks of the Polar Urals on the diagram A-S-C [6], ($A = (Al_2O_3 - (CaO + K_2O + Na_2O)) \cdot 1000$, $S = (SiO_2 - (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + CaO + MgO)) \cdot 1000$ mole count, $C = CaO + MgO$ mass. %). The points of the compositions of the carbonaceous shales are: 1 – epidote-albite-chlorite-quartz-sericite black shale of the Miniseysk suite of the Nyarovei series; 2 – carbonaceous muscovite-quartz shale (quartzite) of the Upper Kharbey suite of the Nyarovei series; 3 – muscovite-quartz and chlorite-muscovite-quartz black shales of the Upper Kharbey and Miniseysk suite of the Nyarovei series; 4 – quartz-carbon-bearing black shales of the Nemuryugan suite.

Таблица 1

Химические составы углеродсодержащих пород няровейской серии и немурюганской свиты, масс.% и г/т

Table 1

Chemical compositions of carbonaceous rocks of Nyarovei series and Nemuryugan Suite, mass % and g/t

Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	НВ-2	НВ-6	НВ-8	Н-4-31	Н-4-26	Н-4-53	Н-4-55	Н-4-27	Н-4-60	Н-7-22	Н-7-21	НМ-25	НМ-27	НМ-28
SiO ₂	70,36	84,22	84,56	95,65	85,87	80,14	83,31	62,92	86,64	77,23	83,65	13,66	25,30	23,12
TiO ₂	0,39	0,22	0,24	0,21	0,25	0,26	0,22	1	0,21	0,46	0,31	0,08	0,07	0,04
Al ₂ O ₃	8,26	5,31	4,88	1,71	5,78	5,21	3,96	16,93	4,46	8,48	8,15	1,94	1,25	1
Fe ₂ O ₃	1,25	1,54	1,17	0,19	1,67	1,84	1,26	2,71	1,41	2,07	1,32	0,23	0,09	0,08
FeO	1,87	1,82	1,90	0,28	0,39	0,58	0,44	3,44	0,79	0,83	1,31	0,42	0,39	0,34
MnO	0,015	0,015	0,017	0,01	0,01	0,03	0,01	0,05	0,07	0,04	0,45	0,02	0,03	0,03
MgO	1,57	1,11	0,88	0,25	1,35	0,73	0,37	2,55	2,45	1,43	1,01	2,7	6,36	8,43
CaO	3,93	0,5	1,06	0,12	0,46	2,58	1,23	0,88	0,44	1	0,35	42,77	32,52	31,46
Na ₂ O	0,17	0,22	0,32	0,08	0,21	0,16	0,13	2,54	0,66	1,68	0,48	0,15	0,12	0,09
K ₂ O	2,23	1,29	1,12	0,06	1,49	1,38	1,26	1,54	0,88	1,85	1,85	0,42	0,27	0,09
P ₂ O ₅	2,87	0,28	0,77	0,02	0,36	5,45	4,20	0,15	0,11	1,13	0,039	0,43	0,22	0,15
CO ₂	0,1	0,13	0,21	0,1	0,1	0,22	0,1	0,11	0,1	0,1	0,12	37,06	32,93	34,98
П,п,п	6,77	3,34	2,63	0,78	2,14	4,18	5,83	5,3	1,88	3,41	1,78	13,66	25,30	23,12
C _{орг} , %	4,03	1,44	1,01	0,35	0,74	2,42	4,11	1,26	0,20	1,14	-	1,11	0,80	0,87
U	2,9	-	2,68	3,7	13	40	27	110	61	84	-	0,53	-	0,28
La	14	-	7,36	18	23	13	25	26	18	9,8	-	4,09	-	1,77
Ce	28,7	-	16,1	35	46	28	49	55	38	22	-	8,77	-	3,38
Pr	3,47	-	2,11	4	5,7	3,5	6,2	6,5	4,8	3	-	1,09	-	0,429
Nd	13,9	-	8,55	15	22	14	25	27	19	13	-	4,38	-	1,88
Sm	2,88	-	1,81	2,9	4,3	3,3	5,4	6,2	3,6	3,3	-	0,864	-	0,423
Eu	0,656	-	0,43	0,48	0,82	0,8	1,1	1,4	0,71	0,86	-	0,256	-	0,142
Gd	2,46	-	1,75	2,2	3,8	3,7	5,2	6,4	3,5	3,6	-	0,819	-	0,419
Tb	0,433	-	0,296	0,3	0,62	0,66	0,89	1,1	0,55	0,61	-	0,13	-	0,0651
Dy	2,72	-	1,76	1,7	3,8	4,4	5,9	6,8	3,2	4,1	-	0,825	-	0,409
Ho	0,556	-	0,341	0,33	0,77	0,94	1,3	1,5	0,63	0,87	-	0,175	-	0,0837
Er	1,56	-	0,921	0,88	2	2,6	3,7	4,1	1,7	2,5	-	0,494	-	0,239
Tm	0,239	-	0,135	0,13	0,28	0,39	0,57	0,63	0,24	0,38	-	0,0669	-	0,0328
Yb	1,54	-	0,826	0,77	1,7	2,5	3,7	3,9	1,6	2,4	-	0,405	-	0,203
Lu	0,238	-	0,116	0,11	0,26	0,4	0,56	0,59	0,24	0,38	-	0,0626	-	0,0288
Th	7,35		2,69	6,3	8,7	11	20	17	8	8	-	1,31		0,74
Mo	5,7		5,59	3,4	5,2	10	11	3,4	2	4,6		0,36		0,39
Sr	86,4		30,5	17	46	91	64	220	26	58		752		634

Примечание: 1-11 – няровейская серия: 1-4 – верхнехарьбейская свита; 5-11 – минисейшорская свита; 12-14 – немурюганская свита; 1-3, 6, 9-11 – мусковит-хлорит-кварцевые сланцы; 4, 5, 7 – мусковит-кварцевые сланцы; 8 – эпидот-альбит-хлорит-кварц-серцитовый сланец; 12-14 – кварц-карбонатные породы.

Note: 1-11 -Nyarovei series: 1-4 – Upper Kharbei suite; 5-11 – Miniseishor suite; 12-14 – Nemuryugan suite; 1-3, 9-11 – muscovite-chlorite-quartz shales; 4, 5, 7 – muscovite-quartz shales, 8 – epidote-albite-chlorite-quartz-sericite shales; 12-14 – quartz-carbonate rocks.

Согласно классификации Я.Э. Юдовича [7], эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитовые черные сланцы являются гипосиллитами, мусковит-кварцевые и хлорит-мусковит-кварцевые метаморфиты относятся к силитам, а кварц-карбонатные породы – к карбонатолитам.

Элементы-примеси. Самые высокие содержания редкоземельных элементов характерны для терригенного эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитового сланца ($\Sigma PЗЭ$ – 147 г/т), сформировавшегося по алевропелиту [8]. Для терригенно-кремнистых мусковит-кварцевых и хлорит-мусковит-кварцевых сланцев количество этих элементов ниже ($\Sigma PЗЭ$ – 42–133,5 г/т). Самые низкие количества лантаноидов имеют кварц-карбонатные породы ($\Sigma PЗЭ$ – 9,5–22,4 г/т). La образует положительную корреляцию с Al_2O_3 (коэффициент корреляции $r=0,5$) и Th ($r=0,85$). Это указывает на то, что глинистое вещество является основным носителем лантаноидов в изучаемых черных сланцах (рис. 3 а и б).

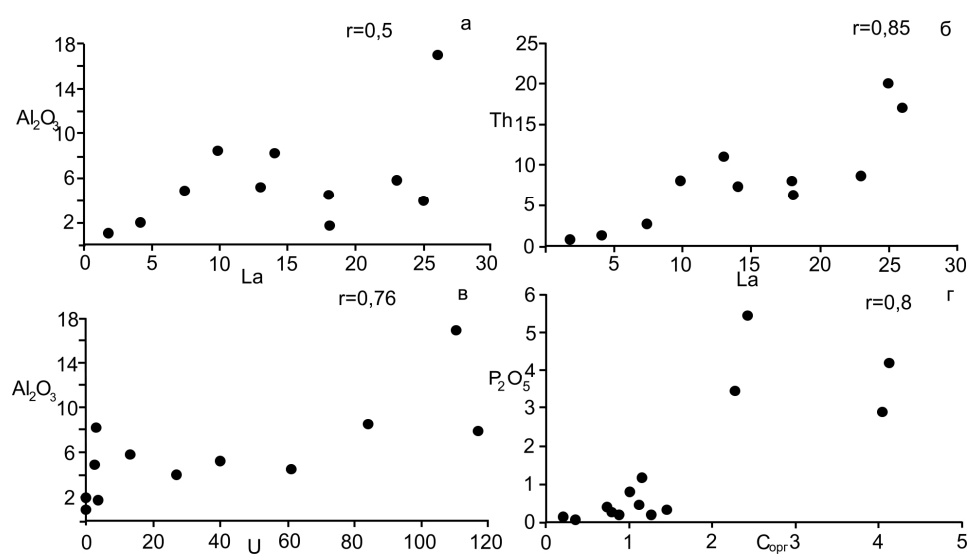


Рис. 3. Вариационные диаграммы La- Al_2O_3 , La-Th, U- Al_2O_3 , $C_{орг}$ - P_2O_5 для углеродсодержащих сланцев верхнепротерозойских отложений.

Fig. 3. Variational diagrams La- Al_2O_3 , La-Th, U- Al_2O_3 , $C_{орг}$ - P_2O_5 for carbonaceous shales of the Upper Proterozoic deposits.

Содержания редкоземельных элементов в сланцах были нормированы относительно содержания этих элементов в хондрите [9]. Спектр распределения элементов в эпидот-альбит-хлорит-кварц-серициновом терригенном черном сланце близок к приведенному для сравнения спектру постаршейского глинистого сланца (рис. 4). Преобладание легких редкоземельных элементов относительно тяжелых указывает, скорее всего, на размывание в питающей провинции пород кислого и среднего составов. Терригенно-кремнистые мусковит-кварцевые и хлорит-мусковит-кварцевые черные сланцы имеют пониженные количества легких и тяжелых редкоземельных элементов за счет уменьшения доли в породах терригенной составляющей. Кварц-карбонатные черные сланцы образуют пологий спектр содержания РЗЭ,

что свидетельствует о том, что в области сноса преобладали породы основного состава.

Типичный элемент для черных сланцев – U [10]. Максимальные аномальные его содержания характерны для эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицинового терригенного сланца и составляют 110 г/т, поэтому эти породы могут считаться как «рудные». В мусковит-кварцевых и хлорит-мусковит-кварцевых кремнистых и терригенно-кремнистых сланцах содержания этого элемента являются как фоновыми, так и аномальными и варьируют от 2,7 до 84 г/т. Самые низкие содержания U характерны для кварц-карбонатных пород – 0,28–0,53 г/т. В породах минеральная форма урана представлена урансодержащим цирконом, уранинитом, U-Th-фосфатовыми минеральными фазами [5]. Связи между U и $C_{орг}$ ($r=-0,11$), U и P_2O_5 ($r=-0,03$), характерные для палеозойских черных сланцев [11, 12], в рассматриваемых углеродсодержащих породах верхнепротерозойских отложений Полярного Урала не наблюдаются. В то же время в изучаемых сланцах имеется сильная корреляция этого радиоактивного элемента с глиноземом ($r=0,76$) и Th ($r=0,57$), что является свидетельством связи его с терригенным веществом, а не с органическим (рис. 3 в). По-видимому, U поступал в бассейн седиментации вместе с глинистыми частицами и накапливался в осадочной породе сингенетически. Не исключено, что в терригенных черных сланцах, кроме аквагенного органического вещества, присутствовало и терригенное ОВ, которое является хорошим сорбентом урана из морской воды. Таким обра-

зом, можно предположить, что терригенные черные сланцы няровейской серии несут ресурсную функцию в урановом рудообразовании. Согласно ранее проведенным исследованиям [13], наиболее перспективным районом для обнаружения терригенных черных сланцев является восточная часть западной зоны распространения няровейской серии, где развиты приконтинентальные отложения.

Фосфор также является характерным минералом для углеродистых пород. В верхнепротерозойских углеродсодержащих сланцах этот элемент входит в состав апатита и U-Th-фосфатовых минеральных фаз. Эпидот-альбит-хлорит-кварц-серициновый терригенный сланец имеет фоновое содержание P_2O_5 – 0,15 %. В хлорит-мусковит-кварцевых и мусковит-кварцевых кремнисто-терригенных

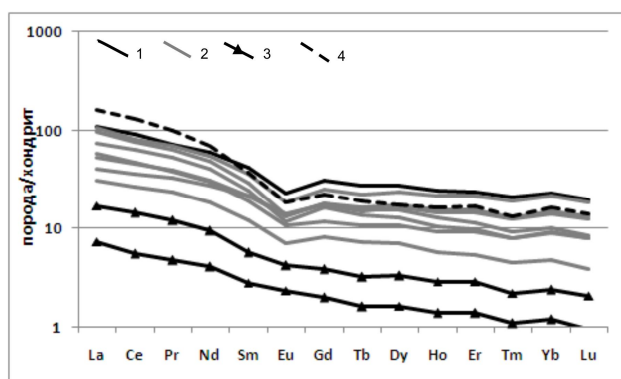


Рис. 4. Геохимический состав углеродсодержащих пород няровейской серии и немурюганской свиты, нормированный по составу хондрита [9]. Спектры распределения элементов: 1 – эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитовый терригенный черный сланец няровейской серии; 2 – хлорит-мусковит-кварцевые и мусковит-кварцевые терригенно-кремнистые черные сланцы няровейской серии; 3 – кварц-карбонатные черные сланцы немурюганской свиты; 4 – PAAS.

Fig. 4. Geochemical composition of carbonaceous rocks of the Nyarovei series and the Nemuryugan suite, normalized in chondrite composition [9]. Spectra of the elements distribution: 1 – epidote-albite-chlorite-quartz-sericite terrigenous black shales of the Nyarovei series; 2 – chlorite-muscovite-quartz and muscovite-quartz terrigenous-siliceous black shales of the Nyarovei series; 3 – quartz-carbonate black shales, 4 – PAAS.

и кремнистых образованиях содержание оксида фосфора составляет 0,11–5,45 % и сопоставляется с фоновым и аномальным значениями. Кварц-карбонатные породы также имеют фоновые количества P_2O_5 – 0,15–0,43%. Наблюдается сильная корреляционная связь ($r=0,8$) между P_2O_5 и C_{org} (рис. 3 г). По-видимому, учитывая наличие в разре-

зе няровейской серии метаморфизованных вулканических пород и метатифов, исходный фосфор поступал в бассейн седиментации из вулканических источников [10], а затем он концентрировался органическим веществом или осаждался в виде фосфатов, что согласуется с мнением И. И. Голубевой с соавторами [14].

Для углеродистых сланцев няровейской серии характерны субкларковые содержания Mo (3,4–11 г/т) и субкларковые и надкларковые количества Th (6,3–20 г/т). Высокое количество Th имеют эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитовые терригенные черные сланцы, что согласуется с представлениями о поступлении этого элемента с основным его источником – обломочным материалом [10]. Крайне низкие количества Mo – 0,36–0,39 г/т и Th – 0,74–1,31 г/т наблюдаются в кварц-карбонатных черных сланцах немурюганской свиты.

Золото в исследуемых углеродсодержащих породах имеет фоновое значение – 1,48–9,54 мг/т и находится, по всей видимости, в рассеянном состоянии (табл. 2). В единичном случае в хлорит-мусковит-кварцевом терригенно-кремнистом черном сланце, расположенном в восточной зоне распространения няровейской серии в непосредственной близости от ингилорского гранитоидного массива, выявлено содержание Au, достигающее промышленного значения (2,6 г/т). В этой области распространения няровейской серии созданы наиболее благоприятные условия для накопления золота в черных сланцах: наличие гранитоидных массивов и близость Главного Уральского надвига, так как присутствие мантийных гранитоидов и разломов считают важным условием для формирования золоторудных месторождений в черных сланцах [15]. Золото, по-видимому, поступает из эндогенного источника, а черные сланцы выпол-

Таблица 2

Содержание благородных металлов в верхнепротерозойских углеродсодержащих породах Полярного Урала, мг/т

Table 2

Noble metal content in the Upper Proterozoic carbonaceous rocks of the Polar Urals, mg/t

Элементы	1	2	3	4*	5*	6*	7*	8*	9*	10*	11	12	13
	НВ-2	НВ-6	НВ-8	Н-4-27	Н-4-26	Н-4-53	Н-4-55	Н-4-31	Н-4-60	Н-7-22	НМ-25	НМ-27	НМ-28
Ru	5,16	7,31	7,93	-	-	-	-	-	-	-	1,43	0,55	0,60
Rh	0,516	0,731	0,793	-	-	-	371	-	-	-	0,143	0,0550	0,060
Pd	19,6	9,89	13,9	655	116	535	240	92	94	291	93,1	62,2	32,1
Os	1,28	0,96	1,40	3	6	14	-	7	5	5	1,06	1,32	0,262
Ir	0,83	0,89	1,08	20	157	8	8	13	9	14	0,66	1,16	0,19
Pt	10,9	4,60	3,98	-	-	-	-	-	-	-	35,4	16,7	10,5
Au	3,96	1,48	0,313	-	-	-	-	-	-	2601	9,54	4,57	2,65

Примечание: Содержания благородных металлов определялись с помощью кислотного разложения исходных образцов и дальнейшего анализа с помощью секторного масс-спектрометра с ионизацией в индуктивно связанной плазме (FS HR ICP-MS) Element2 в Институте геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого (номера без звездочек), а также на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7700 (ICP-MS) в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (номера со звездочками). 1–5, 8 – руч. Нярошор; 6, 7 – руч. Графитовый; 9, 10 – руч. Ингилорьеган; 11–13 – руч. Немурьеган.

Note: The contents of the noble metals were determined by acid decomposition of the initial samples and further analysis using a sector mass spectrometer with ionization in inductively coupled plasma (FS HR ICP-MS) Element2 at the Institute of Geology and Geochemistry named after A.N. Zavaritsky (without the asterisks) and a mass spectrometer with inductively coupled plasma Agilent 7700 (ICP-MS) at the Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch, RAS (with the asterisks). 1–5, 8 – Nyaroshor stream; 6, 7 – Graphite stream; 9, 10 – Ingiloryegan stream; 11–13 – Nemuryegan stream.

няют барьерную функцию для накопления этого элемента.

Углеродсодержащие сланцы няровейской серии имеют повышенные содержания Ig (до 157 мг/т) и Pd (до 655 мг/т), кварц-карбонатные черные сланцы немурюганской свиты – надкларковые содержания Pd (до 93 мг/т).

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

1. Углеродсодержащие породы няровейской серии представлены эпидот-альбит-хлорит-кварц-серицитовыми терригенными, мусковит-кварцевыми и хлорит-мусковит-кварцевыми терригенно-кремнистыми низкоуглеродистыми и углеродистыми черными сланцами, а также углеродистыми аквагенными кварцитами. В немурюганской свите – кварц-карбонатными низкоуглеродистыми черными сланцами.

2. Основным источником RЗЭ, U и Th для верхнепротерозойских черных сланцев является терригенный материал, привнесенный в бассейн седиментации.

В формировании терригенной составляющей черных сланцев няровейской серии участвовали в основном породы кислого и среднего состава, а немурюганской свиты – образования основного состава. Терригенные черные сланцы восточной зоны западной области распространения няровейской серии выполняют, скорее всего, ресурсную функцию в накоплении урана с аномальным его содержанием.

3. Не исключено, что перспективным объектом на золото могут быть черные сланцы восточной зоны распространения няровейской серии, в котором содержание этого элемента достигает промышленных значений и где созданы наиболее благоприятные условия для его концентрации в этих породах: наличие крупных гранитных батолитов и непосредственная близость Главного Уральского надвига.

Автор выражает благодарность д.г.-м.н., профессору А. М. Пыстину.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00146 мол_а, а также при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 18-5-5-19.

Литература

1. *U–Pb LA-SF-ICP-MS датирование цирконов из верхнепротерозойских отложений Полярного Урала* / Н.С.Уляшева, А.М.Пыстин, Ю.И.Пыстина, О.В.Гракова, В.Б. Хубанов // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления». Сыктывкар, 2017. С. 223–224.
2. Душин В.А., Сердюкова О.П., Малюгин А.А. и др. Государственная геологическая карта

Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Листы Q-42-I, II. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 340 с.

3. *Глубинное строение Тимано-Североуральского региона*/Отв. редактор А.М.Пыстин. Сыктывкар: Геопринт, 2011. 264 с.
4. Гракова О.В. Термодинамические условия метаморфизма верхнепротерозойских отложений Полярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2017. №6. С. 13–19.
5. Гракова О.В., Уляшева Н.С. Металлогенические особенности верхнепротерозойских углеродсодержащих сланцев няровейской серии // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2016. № 9–10. С. 16–21.
6. Горбачев О.В., Созинов Н.А. Некоторые петрохимические и геохимические аспекты типизации углеродистых отложений докембрия // Проблемы осадочной геологии докембрия. М.: Наука, 1985. Вып. 10. С. 46–57.
7. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
8. Уляшева Н.С., Гракова О.В. Первичный состав пород няровейской серии (Полярный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2016. № 2. С. 24–35.
9. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Eds.: A.D.Saunders, M.J.Norry. Magmatism in the Ocean Basins // Geological Society of London Special Publication. 1989. №42. P. 313–345.
10. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: Наука, 1994. 303 с.
11. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Т. Уран, торий и калий в черных сланцах баженской свиты западно-сибирского морского бассейна // Литология и полезные ископаемые. 2016. № 1. С. 82–94.
12. Юдович Я.Э., Беляев А.А., Кетрис М.П. Геохимия и рудогенез черных сланцев Пай-Хоя. СПб: Наука, 1998. 366 с.
13. Уляшева Н.С. Геохимические особенности и геодинамическая обстановка формирования верхнепротерозойских отложений няровейской серии // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2017. № 5. С. 20–30.
14. Голубева И.И., Уляшев В.В., Филиппов В.Н. Фосфатонесные рифейские углеродистые кварциты бассейна реки Большая Щучья // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2017. № 5. С. 3–13.
15. Золото в «черных сланцах»/ В.Н.Сазонов, В.Н.Коротеев, В.Н.Огородников, Ю.А.Поленов, А.Я. Великанов // Литосфера. 2011. №4. С. 70–92.

References

1. Ulyasheva N.S., Pystin A.M., Pystina Yu.I., Grakova O.V., Khubanov V.B. U-Pb LA-SF-ICP-MS datirovanie cirkonov iz verhneprotero-

- zojskih otlozhenij Polyarnogo Urala [U-Pb LA-SF-ICP-MS dating of zircons from the Upper Proterozoic deposits of the Polar Urals] // Materials of the All-Russian sci. conf. with intern. partic. "Geodynamics, matter, ore genesis of the East European platform and its folded frame". Syktyvkar, 2017. P. 223–224.
2. *Dushin V.A., Serdyukova O.P., Malyugin A.A. et al.* Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1: 200000 [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000]. Second edition. Polar-Urals Series. Sheets Q-42-I, II. Explanatory letter. St.Petersburg: All Union Geol. Res. Inst., 2007. 340 p.
3. *Glubinnoje strojenije Timano-Severouralskogo regiona* [The deep structure of the Timan-North Urals region] // Exec. Ed. A.M. *Pystin*. Syktyvkar: Geoprint, 2011. 264 p.
4. *Grakova O.V.* Termodinamicheskiye usloviya metamorfizma verhneproterozojskih otlozhenij Polyarnogo Urala [Thermodynamic conditions for metamorphism of Upper Proterozoic deposits of the Polar Urals] // Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS, 2017. №. 6. P. 13–19.
5. *Grakova O.V., Ulyasheva N.S.* Metallogenicheskiye osobennosti verhneproterozojskih uglerodsoderzhashih slancev nyarovejskoj serii [Metallogenetic features of the Upper Proterozoic carbonaceous shales of the Nyarovei series] // Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS, 2016. №. 9–10. P. 16–21.
6. *Gorbachev O.V., Sozinov N.A.* Nekotorije petrohimisheskiye i geochimisheskiye aspekty tipizacii uglerodistykh otlozhenij dokembrija [Some petrochemical and geochemical aspects of the typification of carbon deposits of the Precambrian] // Problems of sedimentary geology of the Precambrian. Moscow: Nauka, 1985. Issue 10. P. 46–57.
7. *Yudovich Ya.E., Ketris M.P.* Osnovy litohimii [Fundamentals of lithochemistry]. St.Petersburg: Nauka, 2000. 479 p.
8. *Ulyasheva N.S., Grakova O.V.* Pervichnyj sostav porod nyarovejskoj serii (Polyarnyj Ural) [Primary composition of the Nyarovei series (Polar Urals)] // Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS, 2016. №. 2. P. 24–35.
9. *Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Eds.: A.D.Saunders, M.J.Norry. Magmatism in the Ocean Basins // Geological Society of London Special Publication.1989. No. 42. P. 313–345.
10. *Yudovich Ya.E., Ketris M.P.* Elementy-primesi v chernyh slanzah [Elements-impurities in black shales]. Ekaterinburg: Nauka, 1994. 303 p.
11. *Zanin Yu.N., Zamirailova A.G., Eder V.T.* Uran, torij i kalij v chernyh slanzah bashenovskoj svity zapadno-sibirskovo morskovo bassejna [Uranium, thorium and potassium in black shales of the Bazhenov suite of the West Siberian marine basin] // Lithology and Mineral Resources. 2016. №. 1. P. 82–94.
12. *Yudovich Ya.E., Belyaev A.A., Ketris M.P.* Geohimiya i rudogenez chernykh slantsev Pai-Khoya [Geochemistry and ore genesis of Pai-Khoi black shales]. St.Petersburg: Nauka, 1998. 366 p.
13. *Ulyasheva N.S.* Geohimicheskiye osobennosti i geodinamicheskaja obstanovka formirovaniya verhneproterozojskih otlozhenij nyarovejskoj serii [Geochemical features and geodynamic conditions for the formation of Upper Proterozoic deposits of the Nyarovei series] // Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS, 2017. №. 5. P. 20–30.
14. *Golubeva I.I., Ulyashev V.V., Filippov V.N.* Fosfatonosnyje rifejskiye uglerodistyje kvarzity bassijna reki Bolshaja Shuchja [Phosphate-bearing Riphean carbonaceous quartzites of the Bolshaya Shchuchya river basin] // Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS, 2017. №. 5. P. 3–13.
15. *Sazonov V.N., Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Velikanov A.Ya.* Zoloto v «chernyh slanzah» Urala [Gold in the "Black Slates" of the Urals] // Lithosphere, 2011, №4. P. 70–92.

Статья поступила в редакцию 27.04.2018.

УДК 550.4:552.578.3:551.762.3(470.11)
DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-83-88

ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЮРСКИХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ (ОБН. БОЛЬШОЙ ВОСИМ, ЯРЕНГСКИЙ СЛАНЦЕНОСНЫЙ РАЙОН, АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛ. РФ)

Д.А. БУШНЕВ, Н.С. БУРДЕЛЬНАЯ, С.В. ЛЬЮРОВ

*Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
boushnev@geo.komisc.ru*

Исследованы геологические и геохимические особенности пород в южной части Яренгского сланценосного района. Согласно результатам микропалеонтологических исследований и изучения аммонитов, отложения относятся к средневожжскому подъярису верхней юры. В статье дана характеристика органического вещества горючесланцевой толщи, а также данные по распределению полициклических биомаркеров. Показано, что исходное органическое вещество представлено как остатками морского фитопланктона, так и терригенной примесью.

Ключевые слова: юрские сланценосные отложения, горючие сланцы, микрофауна, фораминиферы, битумоид, биомаркеры

D.A.BUSHNEV, N.S.BURDELNAYA, S.V.LYYUROV. OF THE JURASSIC OIL SHALES (BOLSHOI VOSIM RIVER OUTCROP, YARENGSK SHALE-BEARING AREA, ARKHANGELSK REGION, RUSSIAN FEDERATION)

Geological and geochemical features at the observation point in the Yarengsk oil shale region in its southern part were investigated. According to the results of the micropaleontological studies and the study of ammonites, the deposits belong to the Middle Volgian substage of the Upper Jurassic. The paper presents the bulk characteristics of the organic matter of the investigated oil shale sequence, as well as data on the distribution of polycyclic biomarkers. The share of oil shales in the section is small. The organic matter has a very low degree of maturity because hopanes have mostly $\beta\beta$ configuration and $\alpha\beta\beta$ steranes are absent. The distribution of regular $\alpha\alpha\alpha$ 20R steranes predominate at the expense of hydrocarbons of composition C_{27} and C_{29} , with the latter more. The original organic matter is represented by both marine phytoplankton residues and terrigenous impurities.

Keywords: Jurassic oil shale deposits, oil shales, microfauna, foraminifera, bitumen, biomarkers

Верхнеюрские горючие сланцы (ГС) на европейском Северо-Востоке известны достаточно давно. История их исследования опубликована [1–6]. В рассматриваемом Чим–Лоптюгском сланцевом участке Яренгского сланценосного района большинство естественных разрезов распространены в бассейнах рек Чим и Лоптюга. На закрытых территориях пробурено большое количество скважин. Примечательно, что горючие сланцы Чим–Лоптюги обладают самым высоким качеством органического вещества (ОВ) среди всех ГС европейского Севера России. Сланценосная толща содержит не менее двух пластов ГС, удовлетворяющих требованиям промышленности по мощности и качеству. Площади с наибольшей сланцеплотностью, пригодные для добычи ГС открытым способом, на значительной части оказались сильно подвержены размы-

ву р.Лоптюги и ее притоков. Сланценосная толща подразделяется на две пачки – темноцветную (верхняя часть) и сероцветную (нижняя часть), которая иногда подстилается пестроцветной. Промышленные ресурсы ГС оцениваются не менее 2.2 млрд. т при теплоте сгорания свыше 7.5 МДж/кг (1800 ккал/кг).

Рассматриваемое нами обнажение (Большой Восим №3) представляет собой выход на дневную поверхность сланценосной толщи мощностью 7,5 м, выполненной переслаиванием глин, керогенсодержащих мергелей и горючих сланцев (рис. 1). В глинистых отложениях встречается довольно многочисленная фауна аммонитов, двустворок и, как правило, в виде отпечатков неудовлетворительной сохранности, целых и обломков ростров белемнитов. Последние в горючих сланцах, как правило, от-

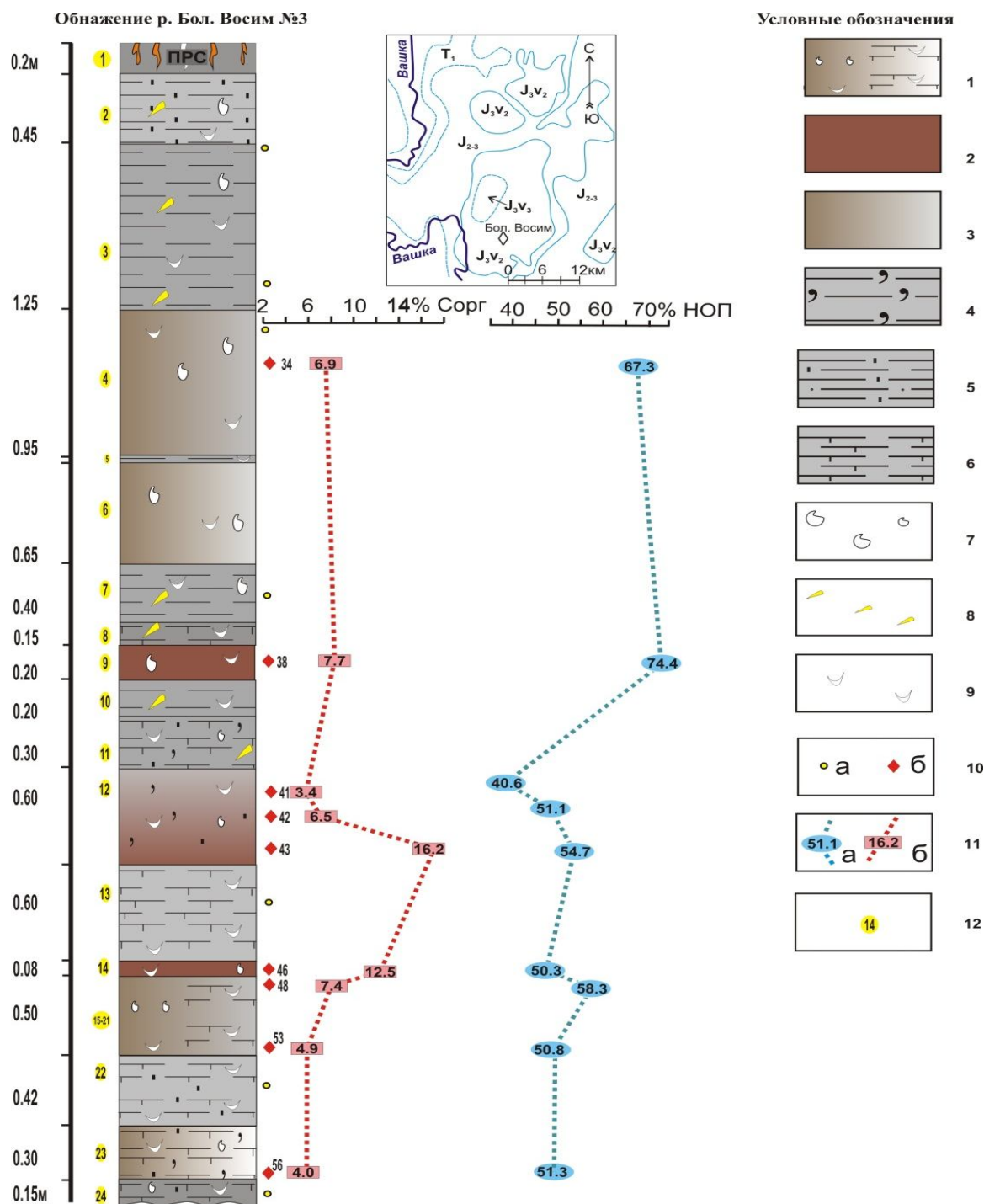


Рис. 1. Точка наблюдения р. Большой Восим №3.

Условные обозначения: 1 – переслаивание горячих сланцев и керогеновых мергелей; 2 – горячий сланец; 3 – горячий сланец глинистый; 4 – битуминозная глина; 5 – глина алевролитистая; 6 – глина известковистая; 7 – аммониты; 8 – белемниты; 9 – двустворки; 10 – точки отбора проб (а – микрофауна, б – органическая геохимия); 11 – содержание в % (а – НОП, б – C_{org}); 12 – номер слоя.

Pic.1. The observation point on the river Bolshoi Vosim No. 3.

Legend: 1 – Interbedding of oil shales and kerogen marls; 2 – Oil shale; 3 – Argillaceous oil shale; 4 – Bitumen clay; 5 – Aleuritic clay; 6 – Calcareous clay; 7 – Ammonites; 8 – Belemnites; 9 – Bivalves; 10 – Sampling points (a – microfauna, b – organic geochemistry); 11 – Content in % (a – ICR, b – C_{org}); 12 – Number of stratum.

сутствуют. По раковинам аммонитов сланценозные отложения относятся к средневожжским отложениям верхней юры (зона *Dorsoplanites panderi* [4–6]. Фораминиферы обычны в ГС, но по мере увеличения в породе доли органического вещества количество их снижается до минимума. Из фораминифер представлены фораминиферы зоны *Lenticulina infavolgaensis* – *Saracenaria pravoslavlevi*, такие как *Lenticulina biexcavata* (Mjatl.), *L. kaschurica* (Mjatl.), *L. ornatissima* (Furs. et Pol.), *Astakolus. suprajassica* (Schwag.), *Marginulina robusta* (Reuss), *Marginulinopsis embaensis* (Furs. et Pol.), *Citharina raricostata* (Furs. et Pol.) и другие [3–5]. Изучение палеотемператур бассейна по вожжским фораминиферам *Saracenaria pravoslavlevi* показало среднее значение в 18–20°C [6].

Содержание органического углерода в породах из изученной части разреза лежит в интервале 4–16 % (см. таблицу). То есть породы разреза умеренно обогащены органическим веществом, а до уровня горючего сланца условно «дотягивает» только одна из изученных проб (43). Содержание хлороформенного битумоида А (ХБА) в породах невелико и составляет величину 0.05–0.5 %, при значениях β^{XB} в основном лежащих в интервале 1–3%, достигая 7 в единичном образце (таблица). В составе исследованных методом жидкостной хроматографии образцов битумоида фиксируется низкое содержание углеводов (сумма алифатических и ароматических углеводов), которое составляет 9–17 %, и значительное содержание смол, оно варьирует от 38 до 48 %. Всё это характерно для органического вещества пород, находящихся на начальных этапах катагенеза.

Геохимическая характеристика сланценозной части разреза р. Большой Восим
Geochemical characteristics of oil shale bearing deposits on the Bolshoi Vosim outcrop

Образец	БВ-41-81	БВ-42-81	БВ-43-81	БВ-46-81
Литология	Кероген-содержащий мергель	Кероген-содержащий мергель	Горючий сланец	Горючий сланец
Битуминологическая характеристика				
C_{org} , %	3,36	6,5	16,19	12,5
ХБА, %	0,097	0,1	0,425	0,3
β^{XB} , %	2,9	1,1	2,6	2,5
Состав биомаркеров				
C_{29} стераны 20S/S+R	0,29	0,26	0,26	0,29
C_{31} гопаны $\alpha\beta 22S/S+R$	0,21	0,12	0,14	0,17
Гопаны C_{31} , %:				
$\alpha\beta 22S+R$	40	37	33	35
$\beta\alpha 22R$	11	12	10	10
$\beta\beta 22R$	49	51	57	55
$\alpha\alpha 20R$ стераны, %:				
C_{27}	35	37	33	34
C_{28}	15	14	16	16
C_{29}	50	49	51	50

Распределение *n*-алканов и изопреноидов, содержащихся в насыщенной фракции битумоида, было изучено методом хромато-масс-спектрометрии путём построения масс-хроматограмм по иону с m/z 57. Молекулярно-массовое распределение нормальных алканов смещено на этих масс-хроматограммах в низкомолекулярную область с максимумами на углеводородах состава C_{16} – C_{17} . Характерного преобладания четных, либо нечетных алканов в области невысоких молекулярных масс не наблюдается. Величина отношения Pr/Ph незначительно превышает 1. В области углеводородов более высокой молекулярной массы наблюдается доминирование нечетных *n*-алканов. Среди них выделяются пики состава C_{25} , C_{27} , C_{29} , C_{31} , C_{33} , C_{35} , C_{37} и C_{39} . Обилие нечетных *n*-алканов в высокомолекулярной области является признаком привноса в бассейн седиментации остатков высшей растительности. Такой состав ациклических изопреноидов в общем характерен и для других проявлений горючих сланцев Восточно-Европейской платформы [7, 8].

Распределение полициклических биомаркеров изучено в составе алифатической фракции битумоида методом хромато-масс-спектрометрии (рис. 2). Основное внимание уделено изучению углеводородов с углеродным скелетом стерана (m/z 217) и гопана (m/z 191). Гопановые углеводороды в составе изученных нами фракций представлены $\alpha\beta$, $\beta\alpha$ и $\beta\beta$ диастереомерными формами. Данные о распределении гопановых углеводородов показаны на рис. 2 и в таблице. Из полученных нами данных следует, что пентациклические тритерпаны, содержащиеся в битумоиде исследуемых юрских отложений, более чем на 50% (углеводороды состава C_{31}) состоят из $\beta\beta$ диастереомеров, т.е. представлены биогопанами [9]. Этот факт позволяет однозначно установить невысокую термическую зрелость исследуемого ОБ, соответствующую зоне протокатагенеза. Отметим, что доля $\beta\beta$ углеводородов падает в ряду C_{31} , C_{30} , C_{29} гопанов.

Ещё одно соотношение гопановых углеводородов, которое используется для определения термической зрелости, это коэффициент $22S/22S+R$ $\alpha\beta$ C_{31} гомогопанов. Его значение в равновесии составляет 0.6 [9], а величина равновесия достигается в самом начале главной фазы нефтеобразования (МК₁). Значения данного коэффициента в исследованных нами образцах битумоида – 0.12–0.21. То есть и значения этого отношения подтверждают вывод о весьма низком уровне зрелости ОБ.

Данные о распределении стерановых углеводородов традиционно используются и для установления термической зрелости ОБ, и для выяснения его природы. За определение катагенеза отвечают такие показатели, как отношение геостеранов, имеющих $\alpha\beta\beta$ конфигурацию к биологическим $\alpha\alpha\alpha$ формам, отношение $20S/20S+R$ изомеров [10]. Геостераны, имеющие $\alpha\beta\beta$ конфигурацию, нами не были обнаружены, а величина отношения $20S/20S+R$

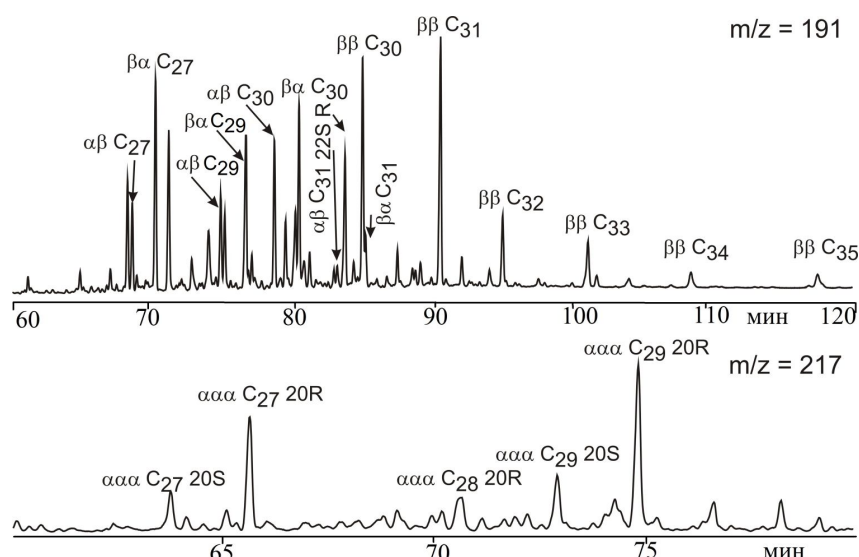


Рис. 2. Масс-хроматограммы алифатической фракции битумоида БВ-43-81, построенные по 191 (гопаны) и 217 (стераны) фрагментарным ионам.
Fig. 2. Mass-chromatograms of aliphatic bitumen fraction BV-43-81 by m/z 191 (hopanes) and m/z 217 (steranes).

для C_{29} стеранов составляет в исследуемых образцах величину 0.26–0.29. То есть результаты исследования стерановых углеводородов подтверждают вывод об отнесении ОВ сланцев к зоне протокатагенеза.

Соотношение регулярных стеранов состава $C_{27}:C_{28}:C_{29}$ широко используется для получения данных об исходном ОВ и фациальных особенностей отложений [9, 10]. Если речь идёт о зрелом ОВ, то для получения численных данных об этом распределении в основном используется соотношение $\alpha\beta\beta$ (20R+S) стеранов, которое определяется по площадям соответствующих пиков на масс-фрагментограмме по 218, иону, или, что предпочтительней по результатам анализа масс-фрагментограмм M^+ – 218, полученных методом GC-MS-MS. В нашем случае $\alpha\beta\beta$ стераны конфигурации не идентифицируются. Поэтому нами рассчитано соотношение $C_{27}:C_{28}:C_{29}$ стеранов по результатам определения $\alpha\alpha\alpha$ 20R стеранов на масс-фрагментограмме по 217 осколочному иону. Содержание стеранов состава C_{29} в пробах Б. Восим превосходит содержание C_{27} и достигает 50% на сумму стеранов $C_{27}:C_{28}:C_{29}$. Результаты исследования стерановых углеводородов находятся в согласии с обнаружением в составе алифатической фракции доминирующих n -алканов состава C_{27} , C_{29} , C_{31} , C_{33} , характерных для остатков терригенного органического вещества. Таким образом, можно заключить, что в данном местонахождении на формирование ОВ сланценовой толщи значительное влияние оказал привнос терригенного ОВ. При этом накопление первоначального осадка происходило в условиях восстановления среды морского бассейна, о чём свидетельствуют низкая величина отношения Pr/Ph , а также геологические особенности пород.

Заключение

Представлена геолого-геохимическая характеристика пород разреза средне-волжской сланценовой толщи, вскрытой в обнажении р. Большой Восим (Архангельская область). Обнажение относится к Яренскому сланценовому району. Обнаружение в породах фораминифер зоны *Lenticulina infavolgaensis* – *Saracenaria pravoslavlevi* и аммонитов, соответствующих зоне *Dorsoplanitespanderi*, позволяет отнести исследуемые отложения средневолжскому подъярсу поздней юры. В разрезе фиксируются повышенные содержания органического углерода, при малой доле в разрезе собственно горючих сланцев. Исследова-

ния молекулярного состава углеводородов биомаркеров позволили сделать вывод о крайне низкой степени зрелости ОВ, соответствующей середине протокатагенеза. Об этом факте свидетельствуют распределение гопановых углеводородов с доминирующими $\beta\beta$ диастереомерами, а также отсутствие $\alpha\beta\beta$ стеранов. В состав ОВ горючих сланцев внесли свой вклад как ОВ морского фитопланктона, так и ОВ терригенного происхождения. На это указывает распределение $\alpha\alpha\alpha$ 20R стеранов, в составе которых доминируют углеводороды состава C_{27} и C_{29} , а также распределение n -алканов и изопреноидов.

Использовано оборудование ЦКП «Геонаука».

Работа выполнена в соответствии с темой НИР «Геология, условия формирования и нефтегазоносность осадочных комплексов Северо-Востока европейской части России, органическая геохимия нефтей и доманикитов» ГР № АААА-А17-117121270033-6.

Работа поддержана темой УрО РАН «Перспективные рудные районы севера Урала, Пай-Хоя и Тимана». № проекта 18-5-5-57. Номер госрегистрации АААА-А17-117121140076-3.

Литература

1. Зытнер И.Я., Зинченко В.А. Ресурсы горючих сланцев Коми АССР // Литология и рудогенез осадочных толщ европейского Северо-Востока СССР. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1982. С. 46–51. (Тр. IX геол. конф. Коми АССР. Кн. 3).
2. Капитанов В.М., Павлов А.М., Лыков С.В. Яренский сланценовый район // Горючие сланцы европейского Севера СССР. Сыктывкар, 1989. С. 63–82.

3. *Лыуров С.В.* Юрские отложения севера Русской плиты. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 139 с.
4. *Анисимов Ю.А., Васильева Л.Ф., Дедеев В.А., Капитанов В.М. и др.* Прогноз сланценоности Европейского Севера СССР. Сыктывкар, 1981. 36 с. (Сер. препринтов сообщений «Научные рекомендации – народному хозяйству»/ Коми фил. АН СССР. Вып. 29).
5. *Чирва С.П., Месежников М.С., Яковлева С.П.* Верхнеюрские отложения Сысольского и Яренгского сланценосных районов Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1988. №4. С.38–50.
6. *Ветошкина О.С., Лыуров С.В., Бушнев Д.А.* Углерод-кислородная изотопия верхнеюрских фораминифер *Saracenaria pravoslavlevi* как показатель условий седиментации // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2013. №10. С. 7–11.
7. *Бушнев Д.А., Лыуров С.В.* Органическая геохимия юрских отложений Сысольского сланценосного района (Республика Коми) // Геохимия. 2002. №2. С.220–227.
8. *Бушнев Д.А., Бурдельная Н.С.* Органическое вещество и условия накопления кашпирских горючих сланцев // Геохимия. 2008. № 10. С. 1037–1050.
9. *Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M.* The biomarker guide: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. 2nd Ed. Cambridge University Press, Cambridge 2005. 1155 p.
10. *Петров Ал.А.* Углеводороды нефти. М.: Наука, 1984. 264 с.
3. *Lyyurov S.V.* Yurskie otlozheniya severa Russkoj plity [Jurassic deposits of the north of the Russian plate]. Ekaterinburg: Ural Branch, RAS, 1996. 139 p.
4. *Anisimov Yu.A., Vasilyeva L.F., Dedeev V.A., Kapitanov V.M. et al.* *Prognoz slancenosti Evropejskogo Severa SSSR* [Forecast of shale value of the European North of the USSR. Syktyvkar: Komi Brach, USSR Ac. Sci., 1981. 36 p. (Series of preprints “Scientific recommendations for national economy”. Issue 29).
5. *Chirva S.P., Mesezhnikov M.S., Yakovleva S.P.* Verhney urskie otlozheniya Sysol'skogo i Yarenskogo slancenosnyh rajonov Russkoj platformy [Upper Jurassic deposits of Sysola and Yarensk shale-bearing areas of the Russian platform] // Proc. of the USSR Ac. Sci. Series Geology, 1988. №4. P. 38–50.
6. *Vetoshkina O.S., Lyyurov S.V., Bushnev D.A.* Uglerod-kislorodnaya izotopiya verhneyurskih foraminifer *Saracenaria pravoslavlevi* kak pokazatel' uslovij sedimentacii [Carbon-oxygen isotopy of the Upper Jurassic foraminifers *Saracenaria pravoslavlevi* as an indicator of sedimentation conditions] // Bull. of Inst. of Geology. Syktyvkar, 2013. №10. P. 7–11.
7. *Bushnev D.A., Lyyurov S.V.* Organicheskaya geokhimiya Yurskikh otlozhenii Sysolskogo slancenosnogo raiona (Respublika Komi) [Organic geochemistry of Jurassic sedimentary deposits in the Sysola shale-bearing area (Komi Republic)] // Geochemistry Intern., 2002. № 2. P. 220–227.
8. *Bushnev D.A., Burdelnaya N.S.* Organicheskoe veschestvo i usloviya nakopleniya Kashpiskikh goryuchikh slantsev [Organic matter and deposition conditions of the Kashpir Oil Shales] // Geochemistry Intern., 2008. № 10. P. 1037–1050.
9. *Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M.* The biomarker guide: Biomarkers and isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. 2nd Ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge 2005. 1155 p.
10. *Petrov A.A.* Uglevodorody nefiti [Petroleum hydrocarbons]. Moscow: Nauka, 1984. 212 p.

References

Статья поступила в редакцию 20.04.2018.

КУЛЬТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗАПОЛЯРНОГО ГОРОДА: ОТ ГОРОДА-КОНЦЛАГЕРЯ – К ГОРОДУ-ПРИЗРАКУ (II часть)

Ю.П.ШАБАЕВ, И.Л.ЖЕРЕБЦОВ, О.В.ЛАБУНОВА

*Институт языка, литературы и истории ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г.Сыктывкар*

*shabaev@mail.illhkomisc.ru, zherebtsov@mail.illhkomisc.ru,
ms.labunova@mail.ru*

В статье рассматривается эволюция культурного пространства заполярного города от времени его возникновения до современности. В центре внимания исследования не столько история становления и развития Воркуты как типичного социалистического города индустриального типа, сколько формирование и развитие городского сообщества и культурной среды городского поселения, его меняющиеся образы. Авторы анализируют три этапа истории Воркуты, на каждом из которых принципиально менялись состав населения, культурное пространство города, городская идентичность. Особое внимание обращено на анализ образов города, символики городского пространства и ментальной карты Воркуты. Исследование основывается на традициях городской антропологии, которая сформировалась как самостоятельная дисциплина в рамках западной культурной антропологии в 1960–1970-е гг. Работа состоит из двух частей. В первой части представлена история возникновения, становления и развития заполярной Воркуты (с 1930-х до 1990-х гг.). Во второй части рассматривается эволюция культурного пространства заполярного города в постсоветскую эпоху. Особое внимание уделено анализу символики городского пространства Воркуты.

Ключевые слова: город, Воркута, культурное пространство, идентичность, городское сообщество, антропология города

YU.P. SHABAEV, I.L. ZHEREBTSOV, O.V. LABUNOVA. CULTURAL EVOLUTION OF THE POLAR TOWN: FROM THE TOWN–CONCENTRATION CAMP TO THE GHOST TOWN (PART II)

The evolution of the cultural space of a polar town from the time of its appearance to the present day is considered. The town of Vorkuta which was based on coal mines and concentration camps, was chosen as the object of study. But the focus of research is not so much the history of the formation and development of Vorkuta as a typical socialist town of an industrial type, but the formation and development of the urban community and the cultural environment of the urban settlement. Particular attention is paid to urban identity and the changing images of the town reflected in the mental map of the town, formed in the minds of its inhabitants. The research is based on the traditions of urban anthropology, developed as an independent discipline within the framework of Western cultural anthropology in the 1960s–1970s. Today it is actively formed in Russia mainly in line with the traditions of domestic ethnography/ethnology and modern social anthropology.

The work consists of 2 parts. The first part presents the history of emergence, formation and development of Polar Vorkuta (from the 1930s to the 1990s).

The second part deals with the evolution of the cultural space of the Polar town in the post-Soviet epoch. Special attention is paid to the analysis of the symbols of the urban space of Vorkuta.

Keywords: town, Vorkuta, cultural space, identity, urban community, urban anthropology

*Продолжение (начало статьи в №2(34) 2018 г.)***От «столицы мира» к городу-призраку.
Третья Воркута**

Во второй половине 1980-х гг. город вступил в новый период своего развития. Эти годы характеризовались важными событиями в жизни Воркуты и всей страны и становлением города в некий символ рабочего движения России. Упадок плановой советской экономики и превращение нефтяной и газовой промышленности в основу энергетики страны привели к тому, что угольная отрасль утратила свой элитный статус, который она имела в прежние советские годы. За этим последовало изменение социального статуса работников угольных предприятий, которые по уровню доходов и социальных благ начали уступать нефтяникам и газовикам. Северные зарплаты и выплаты к концу 1980-х гг. уже с трудом покрывали расходы, связанные со сложившимся северным образом жизни. Рост заработных плат на Севере практически остановился, а цены и издержки семей продолжали расти. При этом воркутинские семьи не могли иметь других доходов (от дачных участков, сдачи жилья в наем и др.), кроме денег, которые они зарабатывали на производстве.

В конце 1980-х гг. резко ухудшилось положение на потребительском рынке и снабжение Воркуты, рубль стал быстро утрачивать функцию средства платежа, а горбачевские реформы привели к попыткам перевода шахт на хозрасчет, что сразу же отразилось на материальном положении шахтеров и членов их семей. Наступившая в это же время «эпоха гласности» позволила сделать публичным достоянием гулаговское прошлое Воркуты, и героический миф о покорителях Севера оказался отодвинутым на второй план и перестал быть основой городской мифологии. По этому поводу профессор В.И.Ильин заметил следующее: «Воркута возникла как гигантский концлагерь, в котором политические заключенные смешались с уголовниками. В результате возникла духовная атмосфера устойчивого антикоммунизма и недоверия к государству. Большинство жителей СССР открывали для себя страшные тайны сталинского ГУЛАГа через газеты и журналы, раскрепощенные в период гласности. Воркутинцы же всегда жили на костях заключенных, на каждом шагу наталкиваясь на памятники страшной эпохи. Население города после свертывания ГУЛАГа существенно обновилось, но дух города-концлагеря не исчезает со сменой его обитателей, он передается по наследству. В Воркуте даже стены домов учили антикоммунизму» [1].

Шахтерская и воркутинская солидарность, сформировавшаяся в предшествующие годы, политическое раскрепощение и «дух антикоммунизма» вместе с резким ухудшением материального положения шахтеров во второй половине 1980-х гг. привели к росту недовольства и развертыванию рабочего движения в Воркуте. 21 января 1989 г. возникла правозащитная организация «Солидарность», которую возглавил рабочий шахты «Комсомольская» Н.Н.Сеничкин и которая стала выпускать

самиздатовский «Вестник «Солидарности»», но это был лишь предвестник массового шахтерского движения.

Первая забастовка произошла в марте 1989 г. на шахте «Северная», которая годом ранее была переведена на хозрасчет. В своей телеграмме, отправленной в Центральный Комитет КПСС, рабочие потребовали выплаты действительной заработной платы, установки твердых расценок на добытый уголь, пересмотра норм выработки, сокращения управленческого аппарата шахты. Местными и республиканскими властями это событие рассматривалось как экстраординарное, и не случайно в Воркуту срочно вылетел министр угольной промышленности СССР М.Щадов. Летом того же года начались забастовки в Кузбассе, и партком воркутинской шахты «Северная» принял решение поддержать бастующих шахтеров, то же самое сделали и на «Комсомольской». Попытки партийных органов поставить нарождающееся рабочее движение под свой контроль успехом не увенчались. Когда летом забастовала шахта «Хальмер-Ю», расположенная в 70 км к северу от Воркуты, ее поддержали на «Воргашорской», затем на «Комсомольской», а к 21 июля бастовало большинство шахт Воркутинского угольного бассейна. В ходе этой забастовки встала проблема самоорганизации шахтеров. 20 июля на «Воргашорской» собрались представители стачкомов всех шахт и здесь был создан Воркутинский межшахтный забастовочный комитет. 21 июля на городском стадионе состоялся многотысячный митинг, на котором были зачитаны требования шахтеров, подготовленные городским стачкомом. Перечень требований включал 43 пункта как политического, так и экономического характера. Но начинался этот документ с политических требований, среди которых были отмена выборов в Верховный Совет СССР от общественных организаций, отмена статьи Конституции о руководящей и направляющей роли Коммунистической партии, требование разработки такой экономической модели, которая бы позволила вывести страну из кризиса, ликвидация объединения «Воркутауголь», возвращение северных надбавок и коэффициентов, улучшение оплаты труда, установка пенсий шахтерам в размере 70% от их заработка, улучшение снабжения Воркуты и другие [1, с.38–40]. Характерно, что шахтеры Кузбасса и Донбасса заявляли о солидарности с воркутинскими шахтерами, но не выдвигали политических требований во время летних забастовок. Власти страны обещали выполнить требования шахтеров, но в октябре министр угольной промышленности издал приказ, запрещавший выплачивать заработную плату освобожденным членам стачкомов. В ответ на это и попытки местных властей оказать давление на шахтеров 25 октября в Воркуте состоялась однодневная политическая забастовка. Затем членов стачкомов шахт попытались привлечь к суду, что вызвало новую волну митингов и забастовок. В конце 1980-х гг. началась «эрозия» партийных организаций Воркуты (местным коммунистам порой прямо говорили: «Мы скоро вас коммуняков вешать на столбах будем») и

официальных профсоюзов, а в 1990 г. был создан Независимый профсоюз горняков Воркуты (на шахте «Воргашорской») был создан свой НПГ, независимые профсоюзы появились и на некоторых других шахтах) и профсоюзные лидеры стали заметными политическими фигурами. К тому же в начале 1990-х гг. шахтерские лидеры говорили, что они могли открывать двери московских министерских кабинетов ногами. И не случайно в конце 1993 г. перед выборами в Воркуту приезжал премьер Е.Гайдар. Первый Президент России Б.Ельцин в мае 1996 г. в ходе своей предвыборной кампании также посещал Воркуту, где лидеры НПГ поддержали избрание Ельцина на второй президентский срок.

Параллельно с НПГ продолжал действовать и официальный профсоюз работников угольной промышленности, который активно занимался делом поступавших в Воркуту по бартеру товаров, путевок, ремонтом домов культуры. Активизация рабочего движения привела не только к его политизации, но и к обострению конфликтов внутри трудовых коллективов, нередко с администрацией шахт, ибо наиболее частым требованием было сокращение управленческого персонала и ИТР.

Трудовые конфликты и забастовки продолжались до конца 1990-х гг. Самыми крупными акциями были: трехмесячная забастовка на «Воргашорской» в 1998 г., сидение на Горбатом мосту возле Дома Правительства в Москве с июня по октябрь в том же году, перекрытие железнодорожных путей. Главным требованием тогда была ликвидация задержек заработной платы, которые достигали нескольких месяцев.

В начале 1990-х гг. Воркута жила за счет бартера. В обмен на поставляемый уголь закупались продукты питания, электроника, автомобили и другие товары, которые затем распределялись среди шахтеров. Поэтому часть заработной платы они получали в натуральном виде. В счет поставок угля в разных регионах страны для воркутинцев строились также квартиры. Бартер и бартерные схемы поставок угля были вынужденной мерой в условиях тотального дефицита позднесоветского и раннего постсоветского периодов, когда рубль перестал быть платежным средством. Но эти схемы породили еще одно явление – так называемое «крышевание бизнеса». Ко второй половине 1990-х гг. теневой и часть легального бизнеса в Воркуте контролировали две теневые структуры. Ядро первой, возглавляемой братьями Владимиром и Олегом Ифа, составляли спортсмены, «афганцы» и бывшие сотрудники милиции, основу второй, во главе братьев Анатолием и Александром Харуками, те, кто уже отсидел и вернулся на волю [1, с. 122–123].

Так параллельно с шахтерской Воркутой заявила о себе (хотя она всегда сосуществовала в тени города трудовой славы) еще и «гангстерская», которая просуществовала довольно долго. Например, следствие по делу организованной преступной группировки «Ифа-Козлова», действовавшей, как писала республиканская пресса, в стиле известных героев фильма «Крестный отец» [2], было завершено только в 2013 г. [3].

С 1993 г. бартер себя изжил, а воркутинские шахты в связи с переходом к рыночному регулированию столкнулись с суровыми реалиями свободного рынка. Оказалось, что в условиях рыночной свободы продукция воркутинских шахт является низкорентабельной, а издержки производства были очень большими. Городское хозяйство также в условиях рынка демонстрировало свою неэффективность, что вело к последовательному росту долгов города. Поэтому власти находились в постоянном поиске и выбивании дотаций.

Выход из сложной экономической ситуации виделся в том, чтобы радикально сократить численность населения города, закрыть нерентабельные шахты и другие производства. В 1983 г. правительство принимает специальную программу санации угольной промышленности. Предполагалось закрыть 42 неперспективные шахты по всей стране, но первой должна быть закрыта шахта «Хальмер-Ю» (которую еще называли «шахтой алиментщиков»). Программа санации разрабатывалась в сотрудничестве с международными финансовыми институтами – Мировым банком реконструкции и развития (МБРР) и Всемирным банком. Они подготовили рекомендации по реструктуризации угольной промышленности России, и они же финансировали закрытие шахт, переподготовку шахтеров, а также переселение воркутинских шахтеров, которых увольняли с закрываемых шахт, в другие регионы страны. В феврале 1996 г. Межведомственная комиссия по социально-экономическим проблемам угледобывающих регионов утвердила программу социально-экономического развития и реструктуризации производства Печорского угольного бассейна. К 2000 г., согласно этой программе, предприятия угольного бассейна должны были выйти на рентабельный уровень производства и перестать получать государственные дотации, а население города в течение довольно короткого времени радикально сократиться.

Сами воркутинцы рассчитывали только на то, что их переезд в более благоприятные регионы оплатит либо государство, либо Всемирный банк. Но процедура предоставления компенсаций на переезд, определение категорий жителей, которым они выдаются в обязательном порядке, организация переселения были связаны с многочисленными проблемами. Все они решались очень тяжело и часто не в пользу воркутинцев.

Первой, как и предполагалось, была закрыта шахта «Хальмер-Ю» и осенью 1995 г. официально ликвидирован поселок при шахте (в нем проживало прежде около 5 тыс. чел.), хотя здесь еще оставались жители. «Окончательная ликвидация Хальмер-Ю проходила с помощью ОМОНа. Вышибали двери, людей насильно загоняли в вагоны и вывозили в Воркуту. Отсутствие энтузиазма у части последних жителей поселка вполне понятно: новое жилье им еще не предоставили, некоторые получили недостроенные квартиры. Переселение же их в общежития и гостиницы Воркуты делало их заложниками обещания властей, которым мало кто верил» [1, с. 202–203]. Второй в очереди на закрытие

оказалась шахта «Промышленная», работников предполагалось перевести на другую неперспективную шахту «Юр-Шор». Поскольку скорое закрытие шахты не планировалось, оно стало осуществляться явочным порядком, что вызвало серьезный трудовой конфликт. Забастовщики потребовали, чтобы всем, кто проработал на шахте 10 и более лет, были предоставлены квартиры в центральной России. Эти требования были неоднозначно восприняты другими шахтерскими коллективами, ибо рассматривались как попытка урвать непомерно много из общего фонда квартир, предоставляемых Воркуте. Конкуренция за квартиры и прочие обещанные властями блага, которая впоследствии только усугублялась, привела к тому, что гражданская солидарность воркутинца, а вслед за этим и сформировавшаяся воркутинская идентичность стали разрушаться. И чем активнее происходил процесс ликвидации шахт и поселков, тем меньше образ воркутинцев как городского сообщества наминал прежний. И не случайно очень часто и жители самой Воркуты, и те, кто знал ее прежней, стали говорить: «Воркутинцы уже не те...». Вместе с переменами в городской идентичности вынужденно менялся и образ жизни воркутинцев, ибо многомесячные задержки заработной платы не позволяли выезжать в отпуска на юг, поддерживать высокий уровень личного потребления и т.д.

За 20 лет реализации программы реструктуризации население города и поселков сократилось почти втрое. Своего пика численность жителей в Воркутинском горсовете достигла в 1992 г. – 219 тыс. чел. В 2015 г. в Воркуте вместе с поселками насчитывалось 83 тыс. жителей. Собственно в Воркуте проживало 60 тыс. чел. При этом в городе довольно много «мертвых душ», ибо часть его «жителей» лишь прописаны в Воркуте, а реально уже давно живут в других городах.

Разрушалась и сформировавшаяся в предшествующие годы пространственная среда города – так называемая модель «шахты по кругу». Поселки городского типа Советский и Цементозаводской были преобразованы в микрорайоны города и в них проживало по 2 тыс. чел. Поселки Рудник, Хальмер-Ю, Строительный, Южный, Монтажный были упразднены, а в поселках Промышленном, Октябрьском, Мульда, Юр-Шор не было ни одного жителя. После закрытия в связи с аварией в начале 2017 г. шахты «Северная» в Воркуте оставалось всего четыре шахты и один открытый угольный разрез. Ныне власти города планируют оставить в составе городского округа только два поселка – Северный и Воргашор. Тем самым «советская Воркута» (Вторая Воркута) будет полностью разрушена.

Резко изменились и общественные настроения. Сегодня многие уже не верят в перспективы развития города, хотя после того, как компанию «Воркутауголь» приобрела «Северсталь», были вложены дополнительные инвестиции в развитие шахт, разработаны проекты строительства двух новых шахт, но кризис 2008 г. и последовавшая за ним стагнация заставили отложить планы развития Воркуты на неопределенный срок. Теперь все наде-

жды ее жителей связаны с тем, что правительство разработало специальную программу социально-экономического развития Арктической зоны, куда включена Воркута, а это на приток в город дополнительных инвестиций. Определенные надежды связаны также с приданием городскому округу статуса Территории опережающего развития.

Но, тем не менее, современная Воркута – это умирающий город и именно так ее воспринимают жители, которые, описывая местную ситуацию, очень часто характеризуют сегодняшний день города примерно одинаково: «Всюду разруха», «Умирающий город». Образ умирающего города строится на социальных реалиях: в городе давно нет барачных домов, поскольку людей из них переселили в панельные дома, откуда выехали жильцы. Но и в этих домах значительная часть квартир пустует, что создает дополнительные проблемы для коммунальных служб.

Реалии Третьей Воркуты заезжим человеком нередко воспринимаются как некий сюрреализм: «Пустые окна брошенных домов с недоверием глядят на гигантский плакат Единой России. *«Больше угля Родине»*, *«Олимпийские надежды растут в Воркуте»*, *«Мы вместе создаем будущее»*, *«Воркута – жемчужина Севера»*. *«Воркута добывает будущее России»* – плакаты с лозунгами будто бы удерживают эту реальность от распада, пытаются убедить, что есть хоть какой-то смысл во всем этом безумии» [4]. В городе, как сказано выше, много пустующих квартир, а их стоимость на рынке упала до минимума. Трехкомнатная квартира в стандартной панельной пятиэтажке стоит порядка 150–200 тыс. руб., и все равно продать ее почти невозможно, поскольку нет спроса. Очень большая часть населения города перестала платить за коммунальные услуги, и долги по коммунальным платежам в городе самые большие в республике. Это связано с тем, что, во-первых, резко упал жизненный уровень воркутинцев. Во-вторых, люди полагают, что если за долги у них отберут квартиру, то это не страшно, поскольку квартира все равно стоит очень недорого, а у большинства жителей преобладают «чемоданные настроения», т.е. желание скорее выехать из города, и перспектива лишиться крыши над головой их не пугает, хотя по закону единственное жилье все равно отобрать за долги нельзя. Желание выехать в город своей мечты, т.е. туда, где будет тепло, много зелени, приемлемые цены на товары первой необходимости и перспективы развития, есть доминанта социальных ожиданий современных воркутинцев:

«Уже семь лет, как Алексей присоединился к армии инвалидов, пострадавших на шахте в результате аварий. Были раздроблены 20 костей – шесть месяцев в больничной палате и три года реабилитации. Вроде бы ничто больше не держит Алексея в Воркуте. Ради будущего детей, ради их учебы и ради самих себя Алексей и Людмила методично откладывают деньги, чтобы в один прекрасный день уехать из Воркуты и поселиться на юге, поближе к родителям Алексея. Их друзья и родственники строят те же планы. Мно-

гие уже оставили Воркуту. А те, кто приезжает работать на газопроводе, который строит "Газпром", не селятся в городе, живут в строительных вагончиках. После работы, спустя месяц-другой, возвращаются домой» [4].

Для тех, кто по делам приезжает в город сегодня, ощущение заброшенности поселения также вполне очевидно. В Воркуте не ведется новое строительство, а его архитектурный и символический облик – это слепок с советского прошлого. Всюду на крышах зданий советские лозунги, воспевающие трудовой подвиг шахтеров («Больше угля – Родине», «Богатства недр – Родине», «Покорителям Заполярья – Слава») или штампы советской пропаганды «Слава КПСС!» [5]. В городе нет автомобильных пробок, как в других городах Коми, ибо Воркута до сих пор не связана с общей сетью автомобильных дорог. Жилой фонд ветшает, участились аварии на коммунальных сетях, порой очень серьезные. Но в социальных сетях Воркута существует и здесь она является более «живым» городом, нежели реальное городское поселение.

В смысле доминирующих общественных настроений Третья Воркута вернулась к своим истокам, ибо почти все население Первой Воркуты жили мечтой о том, как когда-нибудь навсегда уедут из этого города.

Символика городского пространства

Замкнутость социального пространства города и его расположение в центре огромных неосвоенных просторов тундры, его роль в жизни страны и судьбах десятков тысяч граждан СССР и многих других стран (Польши, Германии, Литвы) привела к возникновению в Воркуте неких урбоцентристских настроений, символом которых стал лозунг, провозглашенный, вероятно, самым харизматическим воркутинским мэром Игорем Шпектором на торжественном заседании, посвященном 60-летию города: «Воркута – столица мира!».

Но категория столичности не была каким-то сиюминутным лозунгом, рожденным в ходе торжественных праздничных церемоний и речей. Это было устойчивое восприятие города как некоего *центра освоенного арктического пространства* в недружественной к человеку природной среде. Поэтому появились и многие другие сходные топонимические обозначения города: «Воркута – шахтерская столица», «Заполярная кочегарка» (так первоначально называлась и городская газета «Заполярье»), «Воркута – столица вечной мерзлоты», «Воркута – столица ГУЛАГа», «Воркута – город длинного рубля».

Но наряду с восприятием города как своеобразного центра российского Севера, его изолированность от других городских центров и от освоенного человеком пространства порождало и маркирование города как социальной периферии: «Воркута – край света», «Воркута – медвежий угол». Такое двоякое восприятие города и его социально-культурного пространства вполне очевидно просматривается и во многих других культурных маркерах и символах.

Даже сам миф об истоках Воркуты, т. е. об открытии Печорского угольного бассейна дуалистичен. С одной стороны, есть официальный исторический нарратив, согласно которому заслуга открытия печорских углей принадлежит геологу Г.А.Чернову (реально выявил залежи угля еще его отец А.А.Чернов, который в конце 1920-х гг. обнаружил угольный бассейн и сделал его геологическое описание). С другой, сначала на уровне фольклорного повествования, а затем и в форме альтернативной версии появились рассказы о том, что Печорский бассейн открыл вовсе не русский геолог Г.Чернов, а коми охотник В.Попов [6]. Подобное толкование исторических событий было проявлением борьбы за первенство в обладании символическим пространством города и республики, которая, однако, наиболее очевидно проявлялась в столице республики Сыктывкаре, нежели в Воркуте [44].

Цветовая символика города строится на сочетании двух цветов – черного и белого. Черный – это уголь, и поэтому черный угольный террикон изображен на гербе города вместе с шахтным подъемником и северным оленем, который на гербе белого цвета. Белый – цвет снега, который лежит в городе большую часть года и которым покрыта бескрайняя тундра, окружающая город. Но в городе и поселках снег часто не белый, а серый из-за угольной пыли и сумрака полярной ночи. Поэтому многие воркутинцы говорят о том, что когда впервые попали в Воркуту, то город им показался серым/черным.

Черный цвет – это долгая полярная ночь, а белый – это полярный день, когда солнце практически не садится за горизонт.

Черный – это мрачные и неосвещенные улицы Первой Воркуты, а белый – освещенные прожекторами территории лагерных пунктов.

Черное – это могилы заключенных, которых регулярно размывало во время дождей во многих местах города, а белое – это стремление радоваться жизни даже в тех местах, где покоятся узники ГУЛАГа, устроены стихийные погосты.

Белое и черное в социальной и культурной символике Воркуты присутствуют как символы параллельных реальностей, которые сосуществовали в ин-формационном и культурном пространстве города.

С одной стороны, Воркута – это город покорителей Севера, город трудовой славы, который держится на героическом труде шахтеров в забоях воркутинских шахт. Это белый цвет городской истории и городской символики. С другой стороны, Воркута – столица ГУЛАГа, построенная на костях заключенных сталинских лагерей. Это черный цвет ее истории, ее культурных символов. В эпоху Первой Воркуты в местной газете «Заполярная кочегарка» появлялось много статей заключенных о трудовых подвигах, о социалистическом соревновании и приверженности идеям коммунизма. Но одновременно для внутреннего пользования эти же авторы городской газеты писали песни и стихи, в которых воспевался не героический труд, а рисовались тяготы лагерной жизни.

Вообще, сам воркутинский городской фольклор столь же дуалистичен, сколь дуалистичны социальные и культурные реалии города. В городе эзков не мог не сформироваться мощный пласт тюремного и лагерного фольклора, который затем так или иначе интегрировался в общее культурное пространство города (песня про курьерский поезд есть тому подтверждение). Первый сборник такого фольклора был издан в 1992 г. под громким названием «Песни неволи» [8]. Но одновременно с воровским и блатным фольклором в недрах лагпунктов рождалось огромное количество лагерных стихов и песен, которые не только отражали духовный мир узников ГУЛАГа, но и были «достоверными свидетельствами духовного СОПРОМАТА» [9]. Что же касается обычного городского фольклора, то он находился в тени этих двух культурных явлений и, к сожалению, не был в полной мере оценен и изучен.

У Воркуты есть официальный гимн «Город мой, Воркута», слова написал В.Кузнецов, а музыку А.Н.Пахмутова, исполняемый на официальных мероприятиях. Но есть и не менее популярный неофициальный гимн, написанный на стихи А.Зимин «Гимн старых воркутян», который исполняется чаще участниками клубов авторской песни и местными бардами.

Городское пространство обязательно оценивается воркутинцами в двух ипостасях: природно-климатическом и социальном. Это естественно, ибо природная среда диктовала особенности образа жизни, влияла на здоровье и самочувствие людей гораздо больше, чем в более благоприятном климате. Зимнюю одежду воркутинцы носили с октября по май, а лето было очень коротким и для многих из них, кто предпочитал проводить его на южных курортах или у родственников в центральных областях страны, его практически не было, особенно это касалось детей и жен шахтеров. Природа – есть самостоятельный и важнейший фактор местной жизни и поэтому взаимодействие с ней является неотъемлемой частью всех поэтических произведений, посвященных Воркуте:

«В Воркуте родной моей

10 месяцев – зима.

Веет ветер Хановой

Как завет, так – хана» [10].

Большинство воркутинцев, если не все, отмечают, что для них тягостны характерные особенности местной природы и климата: «не хватает воздуха», небо «давит на тебя», поскольку в высоких широтах, особенно осенью и зимой, появляется ощущение, что небо «висит прямо над твоей головой». Поэтому для многих жителей города ледоход на р. Воркуте воспринимался как праздник, такой же, как и другие наиболее значимые официальные праздники. Именно тогда ломается привычная цветовая символика Воркуты, равно как и в начале осени, когда тундра становится многоцветной, прежде, чем снова стать белой, плоской и придавленной низким черным небом.

Характерной чертой городского пространства является его социальная однородность. Эта особенность в силу известных причин сложилась еще

во времена Первой Воркуты, но затем сохранялась на протяжении всей истории города. В монопромышленном городе, где не было резкого разделения жителей по имущественному признаку, не могли сформироваться элитные кварталы ("золотой берег") и кварталы трущоб, обитатели которых представляли разные полюса городского сообщества. Социальное пространство Воркуты всегда было достаточно однородным. Эта "однородность" пространства помогала сплочению воркутинцев и укрепляла общую городскую идентичность, что, как замечали еще исследователи Чикагской школы социологии, имело важное социальное значение [11]. Конечно, бараки Первой Воркуты, долгое время сохранявшиеся в городской среде, можно было рассматривать как трущобы, но тогда всю территорию города в «эпоху ГУЛАГа» надо воспринимать как одну большую трущобу. А остатки лагерных бараков по своему символическому и историческому смыслу являлись, по сути, историческими кварталами города, тем более, что они сохраняли и номерные наименования прежних лагпунктов.

В Воркуте, как в бывшем «городе эзков», не могло не быть районов, которые воспринимались как криминальные. И такой территорией считался пос. Рудник, а точнее улица Зеленая, где находили себе пристанище люди, которые недавно освободились из мест заключения. Они обычно находили себе работу в геологических партиях, базировавшихся на Руднике.

В целом же, пространство города плохо освоено его жителями. Это определяется как самой историей Воркуты, так и природными условиями и образом жизни. Поэтому в городе не сложились фольклорные прозвища для обитателей отдельных районов и поселков, вследствие чего очень мало параллельных, т. е. народных названий для официальных наименований улиц и площадей города, хотя они, безусловно, были (скопище землянок на Руднике называли «Шанхаем», кинотеатр «Родина», построенный на месте длинного барака, – «лежачий небоскреб» и т. д.). В современных условиях они появиться уже не могут, ибо город продолжают активно покидать его жители, хотя для некоторых Воркута остается родным городом, из которого они никогда не уедут.

Заключение

Характерной чертой Воркуты от времени возникновения поселения до начала XXI столетия являлось то, что гражданская власть здесь существовала только номинально. В эпоху ГУЛАГа все вопросы местной жизни решались через управление Воркутлага. В советские годы ни органы местной власти, ни партийные органы по степени влияния не могли сравниться с объединением «Воркутауголь», которому были подведомственны все шахты города. В 1990-е гг. решающее слово принадлежало лидерам профсоюзов горняков. И только в начале XXI в. традиционные институты представительной и исполнительной власти обрели свое значение, хотя их возможности решать местные дела стали крайне ограниченными, прежде всего, в силу финансовой несостоятельности.

УДК 621.316: 681.3

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-95-100

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА СИНХРОНИЗАЦИЮ ВРЕМЕНИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

М.И. УСПЕНСКИЙ

*Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
uspensky@energy.komisc.ru*

При управлении электроэнергетической системой для определения векторов тока и напряжения применяют технику на основе меток времени от глобальных навигационных систем с целью синхронизации момента измерений в различных ее узлах. В статье рассмотрены пути определения таких моментов, погрешности, вызываемые различными причинами природы используемой методики, даны некоторые оценки воздействия космической погоды на точность момента измерений. Сделан вывод об ограниченности применения подобной техники в управлении энергосистемой.

Ключевые слова: глобальные навигационные системы, СМНР, космическая погода, погрешности момента измерения

M.I. USPENSKY. SPACE WEATHER IMPACT ESTIMATE ON SYNCHRONIZATION FOR WAMS

The equipment based on the global navigation system timestamp is applied to synchronize the measurement moment in various power buses to define the current and voltage phasors at the power system control. There is a number of the natural reasons which reduce synchronization accuracy. These are irregularities in an ionosphere layer due to solar radiation, geomagnetic storms, mutual disposition of the navigation signal satellites and receivers, the final equipment accuracy in receiving and signal processing. In this paper the ways of such moments and the errors caused by various reasons of the nature on used equipment are considered, some estimates of space weather impact on the measurement moment accuracy are given. The conclusion about limited use of such equipment in power system control is made.

Keywords: Global navigation systems, WAMS, space weather, measurement moment errors

Введение

В последнее время в управлении производством электроэнергии используются метки времени от глобальных навигационных систем (ГНС) для синхронизации момента измерений в различных узлах крупных систем с целью получения фазовых сдвигов измеряемых сигналов. Здесь важным является точность в одновременности момента измерений, т.е. чтобы передаваемая с величинами измерений метка времени в различных точках была максимально синхронизирована для всех измерений. Телеметрия, принятая диспетчерским центром и обработанная оперативно-информационным комплексом с учетом меток времени, позволяет диспетчеру получить полную картину развития событий в случае аварий или нестандартных ситуаций. Точ-

ность отсчета времени приобретает еще большее значение в системах мониторинга с применением векторных измерений. Связь точности синхронизации по времени с погрешностью по углу измерения

определяется как $\Delta t_{\text{мкс}} = \frac{1000000}{f[\text{Гц}] \cdot 360^\circ \cdot 60}$, отку-

да для 50 Гц погрешность угла менее 1 мин. требует точности синхронизации 0.926 мкс. Согласно требованиям стандартов [1], для задач электроэнергетики необходимо поддерживать одновременность замеров на уровне 1 мкс.

Глобальные навигационные системы (ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система России, GPS – Global Positional System, система глобального позиционирования США) обеспечивают не только определение географических ко-

ординат, но и точную синхронизацию часов приемников спутниковых сигналов для организации обеспечения единого времени в системах учета электроэнергии, телемеханики, АСУ ТП и релейной защиты и автоматики.

Причины исследований в рассматриваемой области подробнее изложены в работе [2]. Здесь остановимся на некоторых численных оценках воздействия природных явлений на синхронизацию времени в СМГР или в зарубежной литературе WAMS (система мониторинга переходных режимов – Wide Area Measurement System), которая построена на УСВИ или в зарубежной литературе PMU (устройство синхронизированных векторных измерений – Phasor Measurement Unit). Работа СМГР базируется на отметках времени, поставляемых глобальными навигационными системами типа ГЛОНАСС или GPS.

Причины и оценка ошибки синхронизации.

Сначала рассмотрим причины появления ошибок в синхронизации времени. Заметим, что при высоте спутника ГЛОНАСС 19 100 км и его нахождении непосредственно над приемником время распро-

странения сигнала составляет $\frac{19100}{300000} = 63.67$ мс,

где $c = 300\,000$ км/с – распространения радиосигнала. Очевидно, что при нахождении спутника под углом к приемнику эта величина возрастает. Так, если угол возвышения удаленного спутника составляет $\alpha = 20^\circ$, то при радиусе Земли $r = 6366$ км и высоте спутника непосредственно над приемником $h = 19100$ км разность во времени прохождения сигнала от спутников С и В до приемника А Δt составит (рис.1):

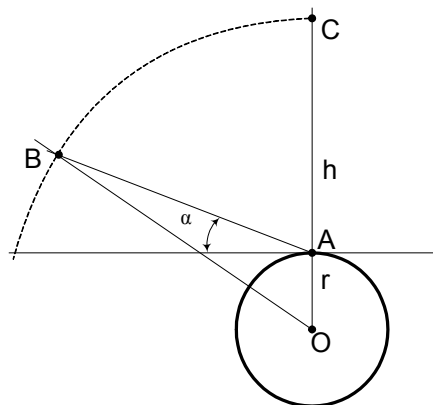


Рис. 1. Разность времени прохождения сигнала.
Fig. 1. A time difference of signal passing.

$$\angle BAO = 180^\circ - (90^\circ - \alpha) = 110^\circ;$$

$$\sin \angle OBA = \frac{r \cdot \sin \angle BAO}{r + h} = \frac{6366 \cdot \sin 110^\circ}{6366 + 19100} = 0.235;$$

$$\angle OBA = 13.58^\circ;$$

$$\angle BOA = 180^\circ - 110^\circ - 13.58^\circ = 56.42^\circ;$$

$$AB = \frac{(r + h) \sin \angle BOA}{\sin \angle BAO} = \frac{(6366 + 19100) \sin 56.42^\circ}{\sin 110^\circ} = 22578 \text{ км};$$

$$\Delta l = 22578 - 19100 = 3478 \text{ км};$$

$$\Delta t = \Delta l / c = 3478000 / 300000 = 11.6 \text{ мс}.$$

Как позиция приемника, так и синхронизация времени для него определяются при известных точном времени на спутнике и скорости распространения сигнала от спутника к приемнику. Рассмотрим это на простом примере (рис.2). Все необходимые переменные, связанные с приемником, а именно позиция L_1 и временная поправка Δt распространения сигнала вычисляются с учетом времени его распространения t_i и известном расстоянии между спутниками L_2 при известной скорости распространения сигнала $c = 300000$ км/с. L_2 определяется по известным координатам спутников [3].

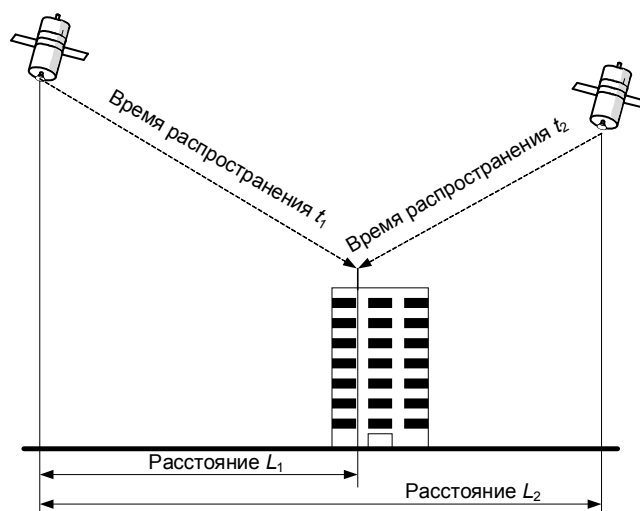


Рис. 2. Определение позиции приемника и времени распространения сигнала до него.
Fig. 2. A receiver position definition and signal propagation time to it.

Для позиции на линии достаточно источников сигнала двух спутников

$$L_1 = \frac{L_2 + (t_1 - t_2) \cdot c}{2}.$$

Для позиции на плоскости требуются три источника, а в пространстве – четыре. Следовательно, для определения расстояния и времени распространения сигналов спутников в 3-мерном пространстве должно наблюдаться не меньше четырех спутников. Заметим, что реально в отсутствии помех (гор, строений или зарослей) можно видеть до пяти ... шести спутников. Расстояние до i -го спутника можно определить как $R_i = t_i \cdot c$. Но поскольку известны координаты только спутников, то расстояние до него в 3-мерном пространстве

$$R_i = \sqrt{(X_{cn,i} - X_{np.})^2 + (Y_{cn,i} - Y_{np.})^2 + (Z_{cn,i} - Z_{np.})^2} + c \cdot \Delta t,$$

где неизвестные переменные позиции приемника $X_{np.}$, $Y_{np.}$, $Z_{np.}$ и погрешность времени распространения Δt , т.е. необходима система с не менее, чем 4 уравнениями. Поскольку реально с позиции приемника наблюдается больше спутников, то систему можно решать методом наименьших квадратов. В

результате получаем расстояния до спутников R_i , по которым можно вычислить и время распространения $t_i = R_i / c + \Delta t$, необходимое для коррекции момента пуска АЦП устройства синхронизированных векторных измерений.

Понятно, что все известные значения находятся с определенной ошибкой. Ниже перечислены причины появления ошибок:

– **Данные по позиции** спутника известны с точностью до $1 \div 5$ м.

– **Часы спутника.** При стабильности генератора 10^{-13} ошибка часов за сутки без учета релятивистских явлений составляет примерно 10 нс. Их учет рассмотрен ниже.

– **Влияние ионосферы.** Ионосфера является частью атмосферного слоя между 60 и 1000 км над поверхностью Земли. Молекулы газа в ионосфере положительно ионизированы. Ионизация, в основном, вызвана солнечным излучением (только во время дня!). Определенное влияние на ионизацию оказывают геомагнитные возмущения в годы активности Солнца. Если сигналы от спутника проходят через вакуум со скоростью света, то в ионосфере скорость этих сигналов замедляется и, следовательно, более не является константой. Уровень ионизации меняется в зависимости от времени и места, усиливается днем и на экваторе, а также под влиянием солнечных штормов. Если влияние ионизации известно, то данный эффект можно компенсировать геофизическими коррекционными моделями. Кроме того, если скорость сигнала зависит от частоты, дополнительно можно сделать коррекцию с помощью двух частот приемника УСВИ, поскольку, чем выше частота, тем сильнее задержка сигнала. Следовательно, можно скорректировать скорость прохождения радиосигнала через ионосферу.

– **Влияние тропосферы.** Тропосфера является частью атмосферного слоя между 0 и 15 км над поверхностью Земли. Возникновение ошибок здесь обуславливается изменением плотности молекул газа и влажности воздуха. Плотность уменьшается с увеличением высоты. Увеличение плотности или влажности замедляет скорость сигналов спутника. Для коррекции данного эффекта используется простая модель на основе стандартной атмосферы (P) и температуры (T): H – высота, м; $T = 288.15^\circ\text{K} - 6.5 \cdot 10^{-3} \cdot H$, $^\circ\text{K}$; $P = 1013$ мбар $(T/288.15^\circ\text{K})^{5.256}$, мбар.

– **Отражение.** Сигналы спутников отражаются от зданий, деревьев, гор и т.д. и отклоняются перед получением приемником. Сигнал искажается из-за интерференции. Эффект отражения сигналов можно частично компенсировать выбором места расположения (без отражателей), хорошей антенны и времени измерения (рис. 3).

– **Влияние приемника.** Дальнейшие ошибки возникают из-за шума измерений приемника УСВИ и задержек по времени в приемнике. Сюда же входят так называемые радиопакеты, радишумы, производимые электромагнитными процессами на Солнце, которые существенно снижают отношение «полезный сигнал/шум». Современные технологии позволяют учесть такое влияние.

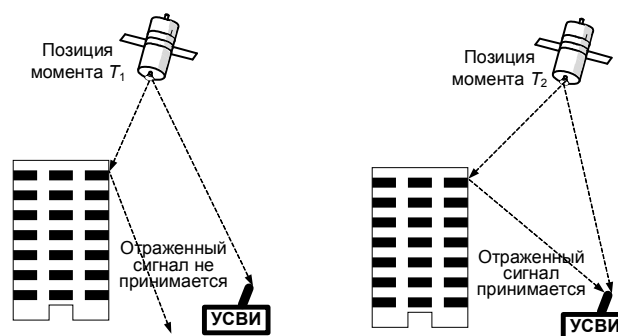


Рис. 3. Наложение отраженного сигнала из-за позиции спутника.

Fig. 3. A reflected signal interference because of a satellite position.

– **Влияние взаиморасположения спутников с учетом их возможного затенения** (DOP – dilution of precision – «снижение точности»). Точность любого измерения пропорционально зависит от величины DOP. Это означает, что если увеличить DOP вдвое, то ошибка в определении позиции возрастет также в два раза. Значение DOP является обратной величиной по отношению к объему четырехгранника, образованного позициями спутников и приемника. Наилучшее геометрическое расположение при максимальном объеме, и, следовательно, минимальном показателе снижения точности DOP. В работе J.-M. Zogg [2] дана таблица оценочных погрешностей по перечисленным причинам (табл. 1).

Оценки погрешностей
Estimates of errors

Таблица 1
Table 1

Причина погрешности	Величина погрешности в позиции, м	Величина погрешности во времени, мкс	Доля погрешности
Данные по позиции	2.1	7	0.195
Часы спутника	2.1	7	0.195
Влияние ионосферы	4.0	13.3	0.370
Влияние тропосферы	0.7	2.3	0.065
Влияние приемника	1.4	4.7	0.130
Влияние взаиморасположения спутников с учетом их возможного затенения	0.5	1.7	0.045
Общее среднеквадратичное значение	5.3	17.5	1.0

Таким образом, причины погрешности точного времени при передаче его сигналов от спутника к приемнику следующие: задержки в аппаратуре источника и приемника, время распространения радиосигнала от источника к приемнику, фазовые сдвиги из-за явлений отражения и преломления в ионосфере и тропосфере Земли, отставание или замедление времени на борту спутника из-за погрешности датчика времени и релятивистских явлений.

Задержки также делятся на детерминированные и недетерминированные. Первые измеряются при подготовке аппаратуры и затем учитываются при синхронизации бортового источника времени с

эталонным источником времени на Земле. Такая синхронизация происходит один-два раза в сутки. Детерминированные погрешности в приемниках также измеряются и учитываются при работе. Погрешность недетерминированной задержки не превышает ± 2 нс [4]. Вклад в погрешность времени из-за релятивистских явлений (разностью времени, отсчитываемой часами на Земле и часами на борту движущегося спутника) оценен в работе С.Н. Филимонова [5], и на широте Москвы часы спутника опаздывают относительно наземных часов на 0.43 нс за каждую секунду или за 39 мин примерно на 1 мкс. Следовательно, коррекция часов спутника должна выполняться с интервалом не более 36 мин, чтобы погрешность расхождения часов не превышала требуемые ± 926 нс. Здесь следует отметить, что при единообразной коррекции эта погрешность не имеет заметного значения, поскольку в задачах СМПР важны не столько точность величины времени, сколько одновременность момента измерений в разных узлах большой системы.

Влияние геомагнитных штормов на синхронизацию. Выше отмечалось, что одной из причин появления ошибки синхронизации является геомагнитный шторм – нарушение в магнитосфере

Земли, управляемое изменениями в солнечном ветре [6]. Таким штормом управляет один из высокоскоростных потоков (вспышки мягкого и жесткого рентгена), либо поток извлечения массы короны, причем последний приводит к более существенным воздействиям. При оценке среднего времени до следующего события в вычислении вероятности возникновения при распределениях Бернулли, т.е. независимых событий, либо происходящих, либо нет с постоянной вероятностью возникновения, можно получить как

$$P(x) = \frac{1}{1 + \tau},$$

где τ – среднее время между событиями, т.е. сумма промежутков времени между событиями на число этих промежутков. Уровни активности Солнца хорошо отражаются количеством солнечных вспышек по датам (рис. 4). Он дает представление о том, в какие промежутки активности Солнца мы получим оценки вероятности возникновения штормовых геомагнитных возмущений. Диапазоны по датам и нижние уровни значения Dst, характеризующего величину шторма, к соответствующим вероятностям приведены в табл. 2 и показаны на рис. 5.

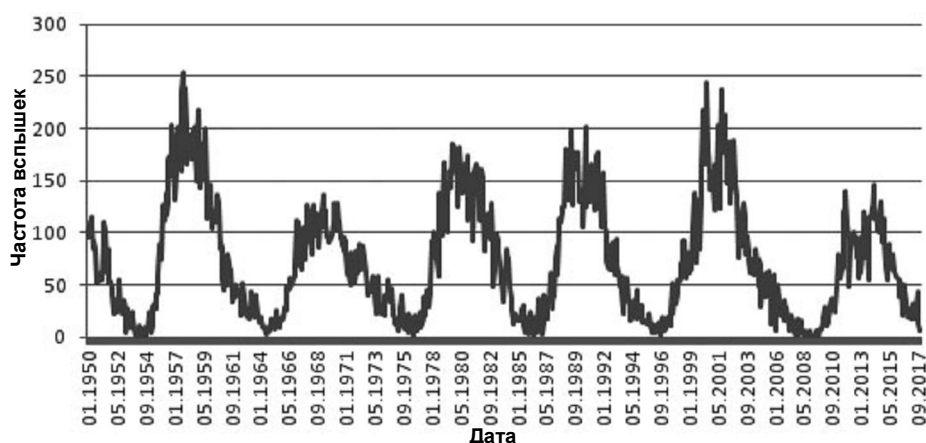


Рис. 4. Уровни активности Солнца по солнечным вспышкам (Использована база данных [7]).
Fig. 4. The Sun activity levels on solar flashes (The database [7] is used).

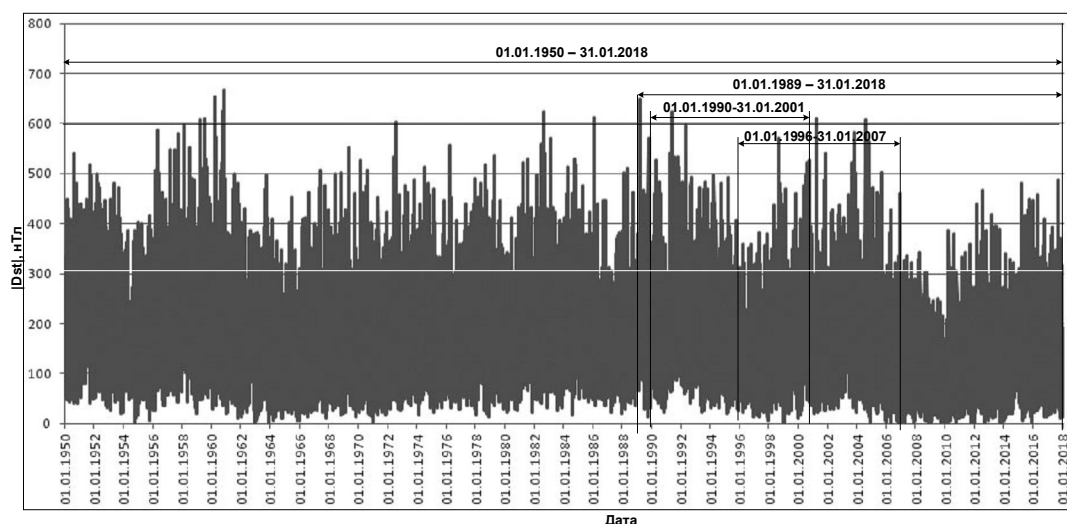


Рис. 5. Значения $|Dst|$ за период 01.01.1950 – 31.01.2018 (Использована база данных [7]).
Fig. 5. $|Dst|$ values during 01.01.1950 – 31.01.2018 (The database [7] is used).

Таблица 2
Оценка вероятности возникновения
геомагнитных возмущений

Table 2
Probability estimate
of geomagnetic disturbance emergence

Диапазон	$ Dst $, нТл	τ , дней	$P(x)$	Примечание
01.01.1950- 28.02.2018	300	8.5	0.105 1/день	За период 67 лет
01.01.1950- 28.02.2018	600	1380	0.209 1/год	За период 67 лет
01.01.1989- 28.02.2018	300	10.4	0.088 1/день	За 28 последних лет
01.01.1989- 28.02.2018	600	1404	0.206 1/год	За 28 последних лет
01.01.1990- 01.01.2001	300	7.9	0.112 1/день	Между 2 минимумами
01.01.1990- 01.01.2001	600	1794	0.169 1/год	Между 2 минимумами
01.01.1996- 01.01.2007	300	10	0.091 1/день	Между 2 максимумами
01.01.1996- 01.01.2007	600	607	0.375 1/год	Между 2 максимумами

Из таблицы видно, что для уровня штормов в 300 нТл вероятность такого возмущения в день составляет в среднем 10%, не сильно отклоняясь в различные периоды солнечной активности (8.8÷11.2%). При уровне $|Dst|$ в 600 нТл вероятность этого события лежит в диапазоне 16.9÷37.5%, но уже в год. В периоды штормов от 300 нТл можно ожидать перерывов в связи с ГЛОНАСС, но здесь важна еще длительность такого перерыва, поскольку при коротких перерывах спасает местный источник точного времени, который синхронизировался по каждой временной метке спутников. Его стабильность обычно лежит в диапазоне $10^{-6} \div 10^{-12}$, что позволяет пропустить метки спутников в течение нескольких минут в зависимости от стабильности генератора приемника. Так, при стабильности генератора 10^{-10} погрешность в 1 мкс наступит уже через 2.8 ч. В табл. 3 даны вероятности того, что событие с $|Dst| > 300$ нТл продлится более 3 ч за различные периоды наблюдения.

Таблица 3
Оценка вероятности продолжительности
геомагнитных возмущений от 3 ч и более

Table 3
Probability estimate of geomagnetic disturbance
duration for 3 and more hours

Диапазон	$Dst $, нТл	$P(x)$, соб./год	Максимальный промежуток, часы
01.01.1950-28.02.2018	300	0.102	12
01.01.1989-28.02.2018	300	0.274	6

Другие причины природного воздействия на синхронизацию. Генератор приемника спасает и в случае прохождения грозы или присутствия солнечных радиопакетов (СРП), когда связь со спутниками ГЛОНАСС может прерываться на короткое время. Подобное влияние СРП на глобальные навигационные системы было отмечено в первый раз 5 декабря 2006 г. при солнечном минимуме. Этот пакет был величиной в 1 млн солнечных флюксов (один солнечный флюкс = 10^{22} Вт·м²Гц⁻¹); 6, 13 и 14 декабря в том же году зафиксированы

события с меньшими потоками. Энергия на частотах ГЛОНАСС была достаточна для вмешательства в работу приемника информации в течение 10 ÷ 20 мин в каждом случае. Данные по позиции нескольких приемников плохо раскодировались (из-за неустойчивости связи) и были потеряны [8]. Следуя приблизительно на 12÷24 ч позади быстрых воздействий, эти пакеты представляли плазменные частицы, связанные с выбросом солнечной короны. Последние косвенно приводят к возмущениям в ионосферной электронной плотности на значительных площадях Земного шара и вызывают крупномасштабные (на 10÷1000 км) структуры и градиенты, подобные волне, в ионосфере. Генерируются также небольшие структуры (меньше чем 1 км), и они вызывают сцинтилляцию (т.е. быстрые изменения по амплитуде и фазе) сигналов. Сцинтилляции* производятся сигналами, рассеянными в ионосфере из-за упомянутых выше ее неравномерностей, так называемых “пузырей” (рис. 6). Такие колебания обычно происходят в экваториальных и высоких широтах, где они представляют серьезную проблему. Во время экстремальных событий космической погоды ионосферная сцинтилляция может наблюдаться и в средних широтах в глобальной форме.

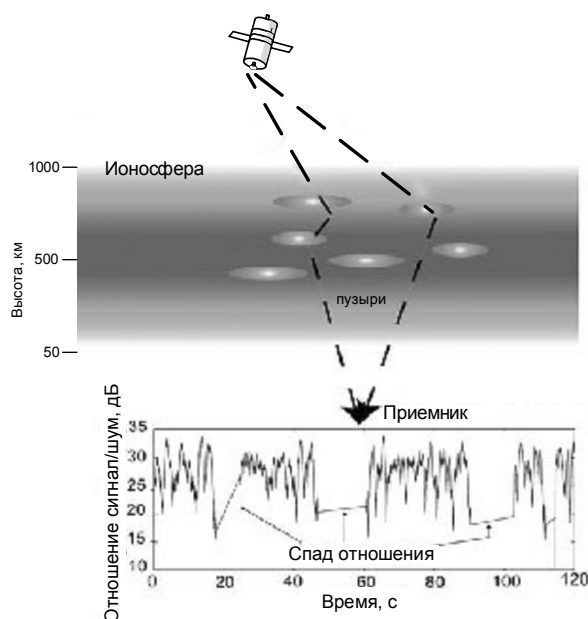


Рис. 6. Влияние ионосферных неравномерностей на отношение сигнал/шум.

Fig. 6. Ionospheric irregularity impact on the signal/noise factor.

Амплитудная сцинтилляция, вызывающая быстрые изменения в соотношении полезный сигнал/шум, может привести к потере сигнала во всех приемниках. Фазовая сцинтилляция, достаточно нару-

* Сцинтилляция – (от лат. scintillatio – мерцание), кратковременная ($10^{-4} \dots 10^{-9}$ с) вспышка, возникающая при взаимодействии заряженных частиц солнечного вещества с ионосферой Земли при солнечных штормах.

шающая фазу полезного сигнала, заставляет фазо-отслеживающий цикл приемника терять блокировку, влияющую на прием важного навигационного сообщения данных, включающего спутниковые эфемериды (данные о положении спутника). Цикл отслеживания кода, измеряющего расстояние до спутника, довольно устойчив к фазовой сцинтилляции и обычно остается заблокированным. Потеря фазной привязки приемника, используемая в высоко интегрированных приложениях, особенно важна, поскольку эти приемники должны регулярно считывать спутниковое сообщение данных. Для смягчения этого спутник базируется на системах приращения, использующих длину символов сообщения в 500 символов в секунду, вместе с длиной половины кодера и повторения сообщений при ошибках пакета сообщения.

К сожалению, оценки разрушения сообщений ГНС, вызванного сцинтилляцией, связанной с суперштормом, плохие. Существующее предположение представляет полную потерю обслуживания сроком на один день, однако весьма вероятно, что будут периоды, когда, по крайней мере, одна группа спутниковых сигналов может быть получена, и синхронизация времени восстановлена. Для критической инфраструктуры рабочее предположение расширено на перерыв обслуживания сроком до трех дней и включает допуск на реинициализацию совокупности спутников (или системы приращения) после шторма.

Заключение

Современные электроэнергетические системы и, в первую очередь “умные” сети, используют временные метки глобальных навигационных систем для синхронизации измерения векторов токов и напряжений. Однако существует ряд природных и технических явлений, отрицательно воздействующих на выполнение такой функции ГЛОНАСС. К природным явлениям относятся геомагнитные бури, сцинтилляции, грозы, а к техническим можно отнести надежность функционирования технических средств ГНС, в том числе, погрешности измерения времени, окружение антенн приемников сигнала спутников ГЛОНАСС. Оценка вероятности событий, связанных с геомагнитными штормами по базе данных [7], показала, что можно ожидать возмущения при $|Dst| > 300$ нТл от 38 до 76 событий в год, а из них длительностью более 3 ч один раз в 4...8 лет. Такие оценки указывают на необходимость резервирования автоматики управления режимами электроэнергетических систем с использованием ГНС менее совершенными, но автономными системами, не привязанными к ГНС.

Литература

1. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems IEEE. Std C37.118.1 2011.
2. Успенский М.И. Природные проблемы синхронизации времени в системе МПР // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 67. Сыктывкар, 2016. С. 396–402.

3. Zogg Jean-Marie. GPS. Essentials of Satellite Navigation/u-blox AG, GPS-Compendium, 2009. 174 p. Available: <https://www.u-blox.com>.
4. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 с открытым доступом и частотным разделением. М.: РНИИ КП, 2008. 74 с.
5. Филимонов С.Н. О некоторых проблемах синхронизации точного времени сигналами ГЛОНАСС // Технологии информационного общества. 2013. №7. С.130–132.
6. Riley P. On the probability of occurrence of extreme space weather events // Space Weather. 2012. Vol.10. Iss.2. P. 1–19. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011SW000734/full>.
7. FTP Directory: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP.
8. Walter T., Hansen A., Blanch J. and Enge P./ Robust Detection of Ionospheric Irregularities// Navigation. 2001. Vol.48. Iss.2. P. 89–100.

References

1. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems IEEE. Std C37.118.1 2011.
2. Uspensky M.I. Prirodnye problemy sinhronizatsii vremeni v sisteme MPR [Natural problems of time synchronization in WAMS] // Metodicheskie voprosy isslegovaniya nadezhnosti bolshih system energetiki [Methodological issues of large power systems reliability]. Issue 67, Syktivkar, 2016. P. 396-402
3. Zogg Jean-Marie. GPS. Essentials of Satellite Navigation / u-blox AG, GPS-Compendium, 2009. 174 p. Available: <https://www.u-blox.com>.
4. Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema GLONASS. Interfejsnyy kontrolnyy dokument. Navigatsionnyy radiosignal v diapazonah L1, L2 s otkryтым доступом i chastotnym razdeleniem [Global navigation satellite system GLONASS. Interface control document. A navigation radio signal in the ranges of L1, L2 with open access and frequency separation]. Moscow: RNII KP, 2008. 74 p.
5. Filimonov S.N. O nekotorykh problemakh sinhronizatsii tochnogo vremeni signalami GLONASS [About some issues of exact time synchronization by GLONASS signals]// Tehnologii informatsionnogo obshchestva [Technology of information soc.]. 2013. No.7.P. 130–132.
6. Riley P. On the probability of occurrence of extreme space weather events // Space Weather. Vol.10, Issue 2. P. 1-19. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011SW000734/full>.
7. FTP Directory: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP.
8. Walter T., Hansen A., Blanch J., Enge P./ Robust Detection of Ionospheric Irregularities // Navigation. 2001. Vol.48. Issue 2. P. 89–100.

Статья поступила в редакцию 18.04.2018.

УДК 001.89:551.34(09)(470.13-17)"193/195"
DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-101-110

ИСТОРИЯ ВОРКУТИНСКОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ МЕРЗЛОТНОЙ СТАНЦИИ В 1930–1950-е гг.

Т.П. ФИЛИППОВА, Н.Г. ЛИСЕВИЧ

ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
tanya.tatiana-fil@yandex.ru, lisewitch.n@yandex.ru

На основе обширного круга документальных источников, ранее не вводившихся в научный оборот, проанализированы основные этапы деятельности и направления работы Воркутинской научно-исследовательской мерзлотной станции в области изучения вечномёрзлых грунтов. Результаты исследований ученых станции послужили основой успешного решения проблем промышленного и гражданского строительства в Воркутинском промышленном районе, оказав тем самым существенное влияние на освоение Печорского угольного бассейна.

Ключевые слова: история науки, Академия наук, мерзлотоведение, г. Воркута, Печорский угольный бассейн

T.P. FILIPPOVA, N.G. LISEVICH. THE HISTORY OF THE VORKUTA PERMAFROST RESEARCH STATION IN THE 1930s–1950-s

On the basis of a wide range of sources the process of creation and formation of the Vorkuta Permafrost Research Station (1936-1958) is studied. Today the history of the Vorkuta Permafrost Research Station (VPRS) is poorly studied. The documentary sources revealed in the Archive of the Russian Academy of Sciences (Moscow), National archive of the Komi Republic (Syktyvkar), Scientific archive of the Komi Science Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (Syktyvkar), Vorkuta Museum and Exhibition Center (Vorkuta) are introduced into scientific use for the first time. The 1920s–1930s became the birth period of a new scientific direction – permafrostology. This science gave an impetus to the systematic study and development of the Arctic. Permafrost stations which opened in the Northern latitudes at the initiative of the USSR Academy of Sciences, solved the problems of industrial and civil engineering in the areas of permafrost distribution. VPRS engaged in the study of permafrost soils in territory of the Pechora coal basin was one of such organizations. The main directions of VPRS research are analyzed, achievements and results of work of scientists, working conditions of the researchers in difficult climatic conditions are shown. The role of the station staff (L.A. Brattsev, V.K. Yanovsky, V.M. Barygin, D.A. Fivevsky, N.I. Saltykov, D.V. Redozubov, etc.) who made a great contribution to the permafrost studies is demonstrated. It is determined that under the guidance of scientists of the station, on the basis of their methods large industrial facilities of the Vorkuta district and Vorkuta were designed, including the first railway in permafrost conditions. The conclusion is made on the leading role of the VPRS scientists in research of permafrost soils which became the basis for the successful solution of construction problems in the Arctic territory.

Keywords: history of science, Academy of Sciences, permafrostology, the town of Vorkuta, Pechora coal basin

История изучения вечной мерзлоты в России насчитывает не одно столетие. Первые упоминания о ее существовании относятся к XVII в. Большое значение имели исследования ученых XVIII–XIX вв. В.Н. Татищева, М.В. Ломоносова, А.Ф. Миддендорфа и др. Научный прорыв в изучении мерзлых пород и явлений произошел в 1920–1930-е гг. и был свя-

зан с развитием строительства и хозяйства в районах распространения вечной мерзлоты. В 1927 г. опубликована книга М.И. Сумгина «Вечная мерзлота почвы в пределах СССР» [1], в которой даны сведения о важнейших результатах исследования мерзлых пород, сформирован понятийно-терминологический аппарат определены границы распростра-

нения вечной мерзлоты. Монография стала основополагающим трудом новой научной дисциплины – мерзлотоведение¹.

Важным фактом для развития молодой науки являлось создание в 1929 г. в системе Академии наук СССР Комиссии по изучению вечной мерзлоты, с 1936 г. – Комитет по изучению вечной мерзлоты, 1939–1961 гг. – Институт мерзлотоведения АН СССР. Первым председателем Комиссии стал исследователь Сибири, геолог, академик В.А. Обручев, его заместителем и фактическим руководителем – М.И. Сумгин. Создание Института мерзлотоведения АН СССР было обусловлено задачами по широкомасштабному освоению районов Севера и Дальнего Востока страны и необходимостью координации научных исследований в области изучения вечной мерзлоты.

Проведение мерзлотных изысканий в районах интенсивного использования природных ресурсов происходило при взаимодействии Академии наук с государственными структурами, такими как Главное управление Северного морского пути при СНК СССР, Народный комиссариат внутренних дел СССР, Народный комиссариат путей сообщения СССР и др. По запросам государственных органов сотрудники Комиссии по изучению вечной мерзлоты АН СССР на договорных началах оказывали консультативно-методическую помощь в организации изучения криолитозоны². Под кураторством Академии наук начался процесс создания разветвленной сети мерзлотных станций, учреждаемых под юрисдикцией этих ведомств.

Первый региональный стационар «Сковородино»³ был организован по инициативе М.И. Сумгина еще в 1928 г. до создания Комиссии по изучению вечной мерзлоты. В 1930–1940-е гг. появились мерзлотные станции в городах Анадырь, Игарка, Воркута, Якутск и мерзотно-гидрогеологические стационары в поселках Усть-Порт, Амдерма. Проводимые в эти годы геокриологические исследования позволили промышленно освоить и заселить сложные в климатическом отношении территории страны, в том числе и арктическую зону. В 1950–1960-е гг. мерзлотоведение находилось на подъеме – развивались новые научные направления, совершенствовалась методика строительства в условиях мерзлых грунтов. Результаты исследований широко внедрялись в практику. Как итог реформирования в начале 1960-х гг. академической науки Институт мерзлотоведения АН СССР в 1961 г. был передан в ведение Госстроя СССР (с 1963 г. перестал существовать). В этом же году был создан Институт мерзлотоведения Сибирского отделения АН СССР,

и исследования по мерзлотоведению сосредоточились в Сибири. На севере Европейской части страны эта тематика перешла в ведение отраслевых организаций.

Сегодня проблема изучения вечной мерзлоты получила новый импульс, безусловно, связанный с вектором государственной политики на усиление исследований в российской Арктике. Климатические изменения, происходящие в этом регионе, воздействуют на свойства вечномерзлых грунтов и безопасность жизни населения [2, 3]. В этой связи особую актуальность приобретает исторический опыт деятельности научных учреждений, стоявших у истоков изучения вечной мерзлоты. Одним из них является Воркутинская научно-исследовательская мерзлотная станция (ВНИМС) (1936–1958 гг.).

Сведения об истории станции, ее деятельности и роли отдельных репрессированных ученых в исследованиях ВНИМС приводятся в ряде работ [4–8]. И все же на сегодняшний день историческая роль и вклад этой организации в исследование вечной мерзлоты остаются малоизученными.

Дополнительные документальные сведения об истории ВНИМС получены авторами в архивах и музеях страны: Архив РАН (г. Москва) [9–15], Российский Государственный архив экономики (г. Москва) [16–17], Воркутинский музейно-выставочный центр (до 2012 г. Воркутинский краеведческий музей) [18–19], Национальный архив Республики Коми (г. Сыктывкар) [20–21], Научный архив Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) [22–23]. Изложение событий в деталях демонстрируют опубликованные воспоминания современников и сотрудников ВНИМС. Выявленные источники сохранили обширные сведения о процессе создания, становления и развития ВНИМС в 1930–1950-е гг.

Одним из главных исторических событий на начальном этапе изучения европейского Северо-Востока стало открытие в 1924 г. Печорского угольного бассейна [7]. Освоение его недр выдвинуло на первый план изучение геологического строения в условиях большой мощности вечномерзлых пород. При развертывании строительства шахт и железной дороги общепринятые нормы, разработанные для условий средней полосы, были не пригодны. С 1936 г. ВНИМС начала мерзлотные изыскания.

В истории ее деятельности выделяются два периода: 1936–1946 гг. – создание и становление станции в ведомстве НКВД СССР; 1947–1961 гг. – функционирование в системе Академии наук СССР (до передачи ее в ведение Госстроя СССР в статусе правопреемника – Северного отделения Института мерзлотоведения АН СССР, г. Воркута).

Период 1936–1946 гг. ВНИМС функционировала с января 1936 г. В этот период между Комиссией по изучению вечной мерзлоты АН СССР и ГУЛАГом НКВД СССР был заключен договор о проведении научно-исследовательских работ на р. Воркуте Северного края [9, л. 1–5]. Свою деятельность начала Воркутинская мерзлотная станция Ухтинско-Печорского исправительно-трудового лагеря НКВД (Ухтпечлаг) [9, л. 1] (в 1938 г. из него выделен Воркутинский лагерь НКВД – Воркутлаг). Местом

¹ Мерзлотоведение (геокриология) – раздел геологии, наука, изучающая мерзлые горные породы, особенности их состава, строения, закономерности, включая подземные и наземные скопления льда и снега. Площадь распространения многолетнемерзлых пород составляет около 65% территории России.

² Криолитозона – верхний слой земной коры, характеризующийся отрицательной температурой пород и почв и наличием или возможностью существования подземных льдов.

³ Сковородино – город (с 1927 г.) в России, административный центр Сковородинского района Амурской области.

дислокации станции стал единственный на тот момент пос. Рудник. В 1938 г. в связи со строительством железной дороги на Воркуту был открыт филиал ВНИМС на станции Абезь⁴, в 1940 г. – филиал в пос. Инта, связанный с освоением Интинского угольного месторождения.

Перед ВНИМС были поставлены две масштабные задачи. Во-первых, инженерно-геологические изыскания по заданию ГУЛАГа в целях проектирования промышленных и гражданских объектов строительства в условиях вечной мерзлоты, во-вторых, изучение мерзлотных процессов по заданию Академии наук СССР. План и программа работ станции разрабатывались совместно Комиссией по изучению вечной мерзлоты и ГУЛАГом. Комиссия руководила исследовательскими работами, давала методические рекомендации, готовила специалистов мерзловедов. Выполнение научно-исследовательских работ осуществлялось путем организации временных инспекторских бригад ученых, направляемых из Москвы и Ленинграда на Воркутское каменноугольное месторождение. В конце полевого сезона ученые переводили в Москву для проведения камеральной обработки собранных материалов и подготовки отчетов с выводами для практического их использования. Результаты передавались в соответствующие структуры ГУЛАГа. Доставка ученых в пос. Рудник, обеспечение их продовольствием, необходимым лабораторным оборудованием и геодезическим инструментом ГУЛАГ осуществлял за свой счет [9]. Такая форма деятельности ВНИМС просуществовала до 1946 г., когда станция была полностью переведена на госбюджет и передана в систему Академии наук СССР.

Первая бригада Комитета по изучению вечной мерзлоты, направленная на р. Воркута в феврале 1936 г., состояла из трех человек: начальник станции В.К. Яновский⁵ и два инженера – Л.А. Братцев⁶ и В.А. Кудрявцев⁷. Они стали пионерами

стационарных исследований вечномерзлых грунтов на европейском Северо-Востоке страны. Прибытие ученых на Воркуту описал в своих воспоминаниях С.П. Раевский [24], один из заключенных ГУЛАГа, впоследствии сотрудник ВНИМС: *«Событием было прибытие в 1936 г. на Воркуту трех научных сотрудников Комитета мерзловедения Академии наук СССР для организации здесь Мерзлотной станции. Среди них главной фигурой был Владимир Константинович Яновский – ученик и близкий друг известного ученого-мерзловеда Михаила Ивановича Сумгина. Вместе с Яновским приехали инженеры Братцев Леонид Александрович и Кудрявцев Владимир Алексеевич. Первый – инженер путей сообщения, второй – горный инженер-гидрогеолог. Все трое вольные люди. <...> Появление трех интеллигентных людей, оказавшихся на равных правах с сотрудниками НКВД, было для всех явлением необычным. <...> Мерзловеды держали себя совершенно независимо, поскольку лагерному начальству не подчинялись. Их дело было руководить Мерзлотной станцией, имея договор с администрацией лагеря. <...> Мерзловеды наблюдали за правилами производства строительных работ в условиях Дальнего Севера и существования здесь многолетних мерзлых грунтов. Кроме того, начали инженерно-геологические изыскания на территории будущего города и на других объектах»* [24].

В то время довольно остро стояла кадровая проблема. В своих письмах, адресованных руководству Комитета по изучению вечной мерзлоты АН СССР, ученые отмечали острую нехватку кадров. Так, в 1936 г. из необходимых 15 работников станции было предоставлено Ухтпечлагом только пять, а в 1937 г. из заявленных восьми для работы направлены только трое [10, л. 12]. В 1937 г. на Воркуту прибыл инженер Д.А. Фивейский⁸. Впоследствии коллектив станции пополнился такими специалистами, как Н.И.Салтыков⁹, В.Ф. Жуков¹⁰, В.М. Барыгин¹¹.

ручевым для развертывания мерзлотных исследований на Воркуте. С 1938 по 1941 гг. он занимал должности главного инженера и заместителя начальника станции, а в 1941–1948 гг. возглавлял ВНИМС. Методы и практические выводы, сделанные Л.А. Братцевым во время работ в Воркуте, были широко внедрены в практику строительства. В 1943 г. за эти заслуги он был удостоен ордена «Знак Почета». Проведенные исследования стали основой кандидатской диссертации «Вечная мерзлота в Коми АССР». С 1949 по 1971 гг. ученый работал в Коми филиале АН СССР [26].

⁷ Кудрявцев Владимир Алексеевич (1911–1982), мерзловед, гидрогеолог, доктор географических наук (1950). В 1932–1938 гг. и 1946–1953 гг. научный сотрудник Института мерзловедения АН СССР. Работал в должности инженера и начальника производственного сектора ВНИМС. Результатом проведенных им исследований являлось издание монографии «Температура верхних горизонтов вечномерзлотной толщи в пределах СССР» (1954 г.). Впоследствии стал основателем научной школы геокриологов Московского университета [27].

⁸ Фивейский Дмитрий Алексеевич (годы жизни неизвестны), инженер, кандидат технических наук (1948), сотрудник Института мерзловедения АН СССР в 1937–1949 гг.

⁹ Салтыков Николай Иванович (1888–1964), инженер-геолог, доктор технических наук (1941), один из основоположников

⁴ Абезь – посёлок в городском округе Инта Республики Коми. Основан в 1942 г.

⁵ Яновский Владимир Константинович (1907–1955), мерзловед, доктор геолого-минералогических наук (1950), начальник Воркутинской научно-исследовательской мерзлотной станции (1936–1939, 1953–1955 гг.). С 1932 г. работал в Комиссии по изучению вечной мерзлоты АН СССР. В 1932–1935 гг. занимался проектированием Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМ). Разработал методику полевых мерзлотно-грунтовых исследований, которая вошла в практику всех последующих дорожных изысканий в северных и восточных районах страны. К 1936 г. он являлся уже признанным в СССР авторитетом в области мерзловедения. Как руководитель ВНИМС смог организовать и наладить работу станции. В 1972 г. в его честь в г. Воркуте на здании Северного отделения НИИ оснований и подземных сооружений имени Н.М. Герсванова установлена мемориальная доска: «Яновский Владимир Константинович (1907–1955) видный советский мерзловед, доктор геолого-минералогических наук. Под его руководством в 1936 г. в нашем городе была создана первая мерзлотная научно-исследовательская станция» [25].

⁶ Братцев Леонид Александрович (1899–1990), инженер-мерзловед, кандидат геолого-минералогических наук (1944). В 1930–1936 гг. работал в Центральном научно-исследовательском институте автомобильного транспорта, начальником Киргизско-Памирской экспедиции, одной из задач которой были работы по изучению вечной мерзлоты. Именно это стало причиной приглашения Л.А.Братцева академиком В.А. Об-



Сотрудники ВНИМС у здания станции. 1940-е гг. Справа налево: Л.А. Братцев, В.Ф. Жуков, В.М. Барыгин, Н.И. Салтыков, Г.П. Софронов [19]. VPRS staff in front of the station. The 1940-s. From right to left: L.A.Brattsev, V.F.Zhukov, V.M.Barygin, N.I.Saltykov, G.P.Sofronov [19].

Ситуация изменилась к 1939 г. Как видно из заключения инспекции по проверке работы ВНИМС Комитета по изучению вечной мерзлоты АН СССР, в этом году штат научного и административного персонала включал – 41 чел. и рабочих – 70-80 [11, л. 1]. В 1946 г. согласно штатного расписания в составе станции работало 92 чел., из них – 59 вольнонаемных и 33 заключенных [10, л. 3].



Первое здание ВНИМС в пос. Рудник [13, л. 9]. The first building of VPRS in the village of Rudnik [13, l. 9].

отечественного инженерного мерзлотоведения. В 1936–1960 гг. сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР.

¹⁰ Жуков Владимир Федорович (1906–1996), инженер-геолог, кандидат технических наук, один из основоположников отечественного инженерного мерзлотоведения. В 1940–1964 гг. – сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР. С 1964 г. работал в НИИ оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР.

¹¹ Барыгин Василий Михайлович (1911–1970), инженер-геолог, кандидат геолого-минералогических наук (1938), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР в 1937–1952 гг. В 1938–1950 гг. работал на ВНИМС, занимался проблемами мерзлотно-гидрогеологического характера.

Уже к 1937 г. в составе станции сформировалась структура, которая включала пять секторов: производственный, стационарных наблюдений и камеральной обработки материалов, опытного строительства, лабораторных испытаний и исследований, административно-хозяйственный. Руководители секторов назначались начальником станции из числа сотрудников с высокой квалификацией, направленных Ухтпечлагом [10, л. 14].

На момент прибытия ученых в Воркуту для ВНИМС не было ни специализированного здания, ни лабораторий, ни жилья. Для обеспечения станции кадрами и лабораториями необходимо было наладить инфраструктуру учреждения, так как оно создавалось фактически на пустом месте. В районе первой шахты для обустройства станции была выделена территория площадью около 5 га. Летом 1937 г. началось строительство первого деревянного здания, в нем обустроены две комнаты для жилья научных сотрудников, а также грунтовая лаборатория и комната для камеральных работ [24]. В 1942 г. построено каменное шлакоблочное здание станции, в котором она располагалась до 1946 г. Для жилья инженерно-технических работников и рабочих из числа заключенных вдоль здания станции построены землянки. Из воспоминаний С.П.Раевского: «<...> землянки с вполне удовлетворительным внутренним оборудованием: топчаны (взамен «вагонок»), печи с плитами. В отличие от барачков в землянках было всегда тепло. Особенно уютной была землянка для старшего инженерного состава. В ней было десять топчанов с тумбочками, письменный стол, предназначенный для



Землянки ВНИМС вдоль берега р. Воркута [13, л. 13]. The earth-houses of VPRS along the river Vorkuta [13, l. 13].

помощника Яновского по административно-хозяйственной части, и большой столовый стол. За этим столом также можно было писать письма и заниматься чем-либо» [24].

Кроме жилых зданий к 1937 г. на балансе станции были инструментальная мастерская, кухня, столовая, мастерская по ремонту обуви, прачечная для обслуживания полевых работ [10, л. 12 об.]. В 1946 г. в распоряжении ВНИМС находились: слу-

жебное здание, пять жилых домов, дома на Хальмер-Ю, Сыр-Яге и на участке Южное поле, три землянки, ледяная камера. Строились теплица, скотдвор, конюшня, свинарник [13, л. 5]. Возведение служебных и жилых помещений, как и их ремонт, осуществлялись силами рабочих станции.

О трудностях в снабжении станции всем необходимым для организации ее работы свидетельствует заключение инспекции Комитета 1939 г.: *«Лаборатория станции помещается в мало приспособленных для этих целей зданиях, необходимо новое здание специально под лабораторию. Необходимо лучшее оборудование по станции, в особенности по лаборатории и в частности лучшее ее снабжение реактивами и посудой. В этом недостатке виноват и Комитет по вечной мерзлоте, которому необходимо в своем составе иметь специальное лицо, ведающее делами Воркутинской станции. Библиотеку станции нужно значительно пополнить книгами и периодической литературой»* [11, л. 2].



Сотрудники ВНИМС сооружают холодильник из снега. 1940-е гг. [18].

VPRS workers make a refrigerator from snow. The 1940-s [18].

Несмотря на суровость климатических условий и колоссальные бытовые трудности, сотрудники станции выполняли большой объем научно-исследовательских работ. С первых дней научная деятельность ВНИМС осуществлялась по двум направлениям: инженерное мерзлотоведение и общие вопросы изучения вечной мерзлоты. Исследования вели научные сотрудники Комитета по изучению вечной мерзлоты, а также ученые из числа заключенных. Приоритетное значение имели вопросы инженерно-геологических и мерзлотно-гидрологических изысканий, связанные с промышленным и хозяйственным освоением Воркутинского района. В этом направлении в период 1936–1946 гг. ученые разрабатывали пять основных тем: «Шахтное строительство в условиях вечной мерзлоты»; «Изучение вечной мерзлоты в связи с проектированием промышленных сооружений»; «Железнодорожное строительство в условиях Воркуты»; «Строительство соцгорода в условиях вечной мерзлоты»; «Сельскохозяйственное освоение и возможности искусственного лесоразведения в районе Воркуты» [22, л.

58–61]. Некоторые направления имели для ВНИМС пионерный характер, как, например, вечная мерзлота и строительство шахт и поиск подмерзлотных вод [11, л. 1].

В основу исследований были положены мерзлотная съемка, полевые и лабораторные испытания грунтов с применением буровых и шурфовочных работ. Результатами исследований ВНИМС были мерзлотно-грунтовые карты обследованных территорий [9, л. 7] с последующей их передачей проектировщикам и строителям. В первый же год функционирования ВНИМС проведены изыскания под строительство локомотивной электростанции на Воркуте. В.К. Яновским была подготовлена инженерно-геокриологическая записка о возможности ее строительства [17, л. 6].

В 1937 г. ученые начали изучение структуры и свойств вечномерзлых грунтов под закладку мощной шахты Капитальная №1. На участках шахтного строительства ВНИМС производила геологическую и геоботаническую съемки, исследовала грунты и залегание вечной мерзлоты и готовила заключения для проектирования способов крепления шахтных стволов и возведения надземных сооружений [20]. Этот опыт исследований в дальнейшем был использован при решении вопросов строительства других шахт Воркутинского района. В этом же году (после закладки шахты «Капитальная») на левом берегу р. Воркута началась закладка второго жилого поселка, в котором на основе разработанной методики ВНИМС был построен первый деревянный двухэтажный жилой дом (до этого на Воркуте люди жили в землянках, палатках, бараках). Впоследствии станции пришлось решать задачи по возведению на вечномерзлых грунтах каменных зданий.

В течение последующих десяти лет станция проводила инженерно-геологические исследования для всех гражданских и промышленных объектов Воркуты (ремонтно-механический завод, деревообрабатывающий комбинат, железнодорожное депо, жилые здания и т.д.), осуществляла изыскания для прокладки первой в условиях вечной мерзлоты северной железнодорожной магистрали Воркута–Котлас (участок Воркута–Абезь) и наблюдения за состоянием ее полотна в период эксплуатации.

С первого года основания ВНИМС проводились метеонаблюдения. Организация трех метеопунктов позволила получить первые сведения о климате Воркутинского района. На основе метеосъемки станция ежедневно выпускала синоптические сводки. Метеорологическими исследованиями руководил А.И. Постоев, заключенный Воркутлага, бывший директор Ташкентской обсерватории. В 1942 г. один из метеопунктов станции со штатом и оборудованием был передан на построенный в Воркуте аэродром [17, л. 7].

С 1938 г. важным направлением ВНИМС стало изучение гидрогеологического режима мерзлотных, межмерзлотных и подмерзлотных вод Воркутинского района. На р. Воркута и ее притоках Аяч-Яга и Сыр-Яга были организованы гидропосты. Проведены первые гидрологические наблюдения и

гидрогеологическая съемка территории с целью определения возможности водоснабжения поселков и промышленных предприятий за счет подземных вод. Эти исследования начал гидрогеолог ВНИМС В.М. Барыгин, которым были найдены и классифицированы сотни подземных источников. Увеличение масштабов строительства будущего города, количества шахт с каждым годом повышало значимость для Воркутинского района гидрогеологии [17, л. 8].

Одним из направлений изучения особенностей природных условий стало проведение ВНИМС опытных наблюдений. Вдали от строительства будущего города станция организовала первую опытную площадку для наблюдений за температурой грунтов и ролью растительного и снежного покрова в температурном режиме грунтов. С течением времени площадка устаревала и на другом месте создавали новые [17, л. 9].

Большое значение имела начатая ВНИМС геоботаническая съемка территории Воркуты в сочетании с буровыми и шурфовочными работами. Это было особое научное направление инженерно-геокриологических работ, которые позволяли изучать закономерности распространения и залегания мерзлых грунтов в связи с рельефом и растительностью. Исследования проводили В.К. Яновский, В.А. Кудрявцев и Л.А. Братцев. Результаты опытов ВНИМС были использованы в инженерно-геокриологических изысканиях других регионов страны [17, л. 11].

Уникальными на тот момент стали опыты по ведению сельского хозяйства в условиях Заполярья. Суровые природные условия Воркуты, куда завоз фруктов и овощей был крайне затруднен, поставили перед учеными-мерзлотооведами столь необычную для их профиля актуальную задачу. Разработке этого направления исследований способствовало базовое образование двух основателей станции. В.К. Яновский и Л.А. Братцев имели высшее образование, полученное в сельскохозяйственных ВУЗах. Руководил сельхозучастком заключенный Воркутлага В.М. Савич¹². В 1937 г. сотрудники ВНИМС заложили сельхозучасток (построена первая теплица и подготовлен в пойме р.Воркута огород) для проверки возможности ведения в заполярных условиях овощеводства. В 1939 г. построена вторая теплица и заложен большой пром-огород площадью около 2 га. Первый крупный урожай станция получила уже в 1938 г. – около 2 т овощей. Большую часть сотрудники ВНИМС передали в больницу, оставшиеся пошли на продажу. Научные результаты работы станции явились доказательством возможности произрастания и созревания овощей в условиях Заполярья [21, л. 12–13 об.].

Весомый вклад в проведение исследований за первые десять лет деятельности ВНИМС внесли

исследователи из числа репрессированных: Д.В. Редозубов¹³, М.С. Водолазкин¹⁴, И.В. Бойко¹⁵ и др. Некоторые из них после освобождения связали свою дальнейшую работу именно с изучением вопросов вечной мерзлоты [4, с. 114]. Итоги многолетних исследований ВНИМС отражены в научно-технических отчетах (за первое десятилетие их более 300), докладных записках в Институт мерзлотоведения АН СССР и Управление ГУЛАГа [22, л. 58–61]. Для проектировщиков и строителей в «Справочнике по Воркуте» (1942 г.) обобщены ежедневные наблюдения об особенностях природных условий Воркутинского района [17, л. 17]. В трудах Института мерзлотоведения АН СССР (VI том, 1944 г.) опубликованы итоги научных исследований Г.П. Софронова¹⁶, Д.А. Фивейского и В.Ф. Жукова, посвященных четвертичным отложениям Воркутинского района и особенностям строительства шахт в условиях вечной мерзлоты [28]. Таким образом, ученые, проводившие комплексные исследования, предоставляли информацию о своих результатах и полученных научных знаниях общественности.

Период 1947–1961 гг. В конце 1930 – начале 1940-х гг. интенсивными темпами шло изучение новых районов добычи в Печорском угольном бассейне. После 1938–1939 гг., в результате роста темпов строительства, значительно увеличился и объем инженерных изыскательских работ ВНИМСа. В 1938 г. из состава Ухто-Печорского треста выделено самостоятельное управление «Воркутстрой» (с 1944 г. – комбинат «Воркутауголь»). Материалы исследований мерзлотной станции внедрялись в практику работы этой новой организации. С каждым

¹³ Редозубов Дмитрий Васильевич (1904–1970), мерзлотовед, гидрогеолог. В 1936 г., осужден на пять лет по 58 ст. УК РСФСР. Срок отбывал в Воркутлаге. Освобожден в 1941 г. Занимался исследованиями температурного режима вечно-мерзлой толщи, предложил новые методы терморазведки. После освобождения он защитил диссертацию и работал в Воркутинском филиале Ленинградского горного института. Один из инициаторов организации в Воркуте Учебно-консультационного пункта Всесоюзного заочного политехнического института.

¹⁴ Водолазкин Михаил Семенович (1909–1961), мерзлотовед. В 1934 г. арестован и осужден на пять лет по 58 ст. УК РСФСР, отбывал заключение в Воркутлаге. Работал в отделе изысканий ВНИМС. Провел важнейшие работы в области мерзлотно-грунтовых изысканий для строительства Северо-Печорской железной дороги. В 1947 г. возглавил Геотехническую контору комбината «Воркутауголь». Получил амнистию в 1953 г.

¹⁵ Бойко Иван Васильевич (1917–1977), физикохимик, кандидат технических наук (1957). В 1944 г. арестован и осужден на пять лет по ст. 58 УК РСФСР. Отбывал заключение в Воркутлаге, освобожден в 1949 г. без права выезда. Работал во ВНИМС, исследовал фазовый состав мерзлых грунтов. С 1963 г. заведующий лабораторией физикохимии грунтов Северного отделения Института мерзлотоведения Гостроя СССР, в 1968–1973 гг. – директор Северного отделения НИИОСП им. Н.М. Герсевича.

¹⁶ Софронов Георгий Петрович (1902–1975), геолог, заслуженный деятель науки и техники Коми АССР. В 1935 г. арестован и осужден по ст. 58 УК РСФСР на пять лет, заключение отбывал в Воркутлаге. В 1946 г. за открытие Харбейского месторождения молибденита, а также залежей хромита, магнетита с него была снята судимость. До 1956 г. работал в Воркуте.

¹² Савич Владимир Михайлович (1885–1965), ботаник-садовод, доктор сельскохозяйственных наук (1961). С 1924 г. возглавлял Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства. В 1933 г. арестован, осужден по 58 ст. УК РСФСР, приговорен к десяти годам заключения, отбывал срок в Воркутлаге. Освобожден в 1945 г.

годом увеличивались темпы закладки шахт. В течение 1940 г. заложено сразу четыре шахты. В годы Великой Отечественной войны увеличился объем инженерных работ станции, так как возросло значение воркутинского угля.

После присвоения Воркуте статуса города в 1943 г. [29, с. 40] его строительство приобрело государственное значение. Уже к 1943 г. на Воркуте заложено более десяти шахт, построено свыше 50 домов, деревообрабатывающий комбинат, больница. Изменился характер строительства. Деревянные и каменные одноэтажные здания сменили многоэтажные дома городского типа. Возникла необходимость усложнения шахтного строительства, возводимого до этого периода на легких конструкциях. В начале 1940-х гг. стала очевидной недостаточная оснащенность ВНИМС для проведения инженерных работ такого масштаба. Увеличение объемов участия в проектировании строительных объектов отодвинуло на второй план работы станции как научного учреждения.

В 1945 г. по инициативе «Воркутауголь» МВД СССР был поставлен вопрос о реорганизации мерзлотной станции, который поддержал Институт мерзлотоведения АН СССР. 16 октября 1946 г. Советом Министров СССР принято решение о реорганизации Воркутинской научно-исследовательской мерзлотной станции путем ее разделения в 1947 г. на две организации – Геотехническую контору комбината «Воркутауголь» и Воркутинскую научно-исследовательскую мерзлотную станцию Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР [14]. В задачи Геотехнической конторы вошли полевые мерзлотно-грунтовые изыскания под объекты строительства комбината «Воркутауголь», лабораторная обработка полевых материалов и камеральное оформление. Возглавил эту организацию сотрудник ВНИМС М.С. Водолазкин. Мерзлотная станция была передана в ведение Академии наук СССР и финансировалась исключительно из союзного бюджета. За ней остались научно-исследовательские работы по изучению вечной мерзлоты, научное обобщение полевых материалов, накопленных за прежние десять лет и мониторинг за объектами строительства. Руководителем станции оставался Л.А. Братцев, затем его сменили И.А. Тютюнов¹⁷ (1949–1952), В.К. Яновский (1953–1955), В.П. Бакакин¹⁸ (1955–1959), В.Ф. Жуков (1959–1961), А.В. Садовский¹⁹ (1962–1964). Штатная численность станции на период реорганизации составила 21 чел. [14, л. 17].

¹⁷ Тютюнов Иван Алексеевич (1913–1997), геолог, доктор геолого-минералогических наук (1956), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1950–1963 гг., начальник ВНИМС в 1949–1952 гг.

¹⁸ Бакакин Валентин Петрович (1907–1979), инженер-геолог, доктор технических наук (1954), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1950–1963 гг., начальник ВНИМС (директор Северного отделения Института мерзлотоведения АН СССР) в 1955–1959 гг.

¹⁹ Садовский Андрей Владимирович (1929–2006), инженер-геолог, кандидат технических наук (1961), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1950–1963 гг., директор Северного отделения Института мерзлотоведения Госстроя СССР в 1962–1963 гг.

Годовой отчет ВНИМС за 1947 г. показывает трудности, с которыми столкнулись сотрудники в результате реорганизации: *«Отчетный 1947 г. характерен для Воркутинской мерзлотной станции весьма сложной обстановкой, которая была вызвана переводом Станции с договорных работ на госбюджет. Следствием этой организационной перестройки <...> явилось резкое осложнение взаимоотношений Станции с комбинатом Воркутауголь. Это обстоятельство чрезвычайно отрицательно отразилось на успешности работ Станции в 1947 г. <...> С момента реорганизации Станции и перевода ее на госбюджет комбинат Воркутауголь резко изменил свое отношение к Станции, приравняв ее к посторонним организациям, не имеющим прямого отношения к основной задаче Комбината – освоению Печорского угольного бассейна. <...> Указанные трудности и связанная с ними общая обстановка работы характеризуются четырьмя основными моментами: незаконным изъятием научных фондов станции; бюрократической волокитой и отказом в строительстве зданий Станции; экономическим ущемлением сотрудников Станции; проведением общей политики препятствования работам Станции»* [15, л. 15].

В 1948 г. Совет Министров Коми АССР и База АН СССР в Коми АССР обратились в Совет Министров СССР с просьбой о передаче ВНИМС в ведение академической базы с преобразованием ее в Воркутскую комплексную станцию. Данный вопрос был поднят в связи с решением комбината «Воркутауголь» закрыть Воркутинскую сельскохозяйственную опытную станцию, организованную в 1940 г. для научных работ сельскохозяйственного профиля. Однако данная просьба осталась без удовлетворения, так как Академия наук СССР считала данный проект нецелесообразным по причине «уже налаженной работы системы мерзлотных станций» [23].

Несмотря на передачу инженерно-геокриологических изысканий комбинату «Воркутауголь», деятельность ВНИМС в конце 1940–1950-х гг. включала два направления – вопросы общего и инженерного мерзлотоведения. Ученые продолжили работу по обследованию Печорского угольного бассейна. Был предпринят ряд экспедиций в районы рек Адзья, Колва, Коротаиха. В 1952 г. мерзлотной станцией была организована многолетняя Комплексная северная геофизическая экспедиция, которая в течение нескольких лет проводила расширенные мерзлотные исследования в Большеземельской тундре (начальник А.Т. Акимов²⁰) [16, л. 4]. Продолжались работы по картированию новых месторождений на Хальмер-Ю, Сыр-Яге, Пембое, Воргашоре, Усе с изучением гидрогеологии и геологии четвертичных отложений Воркуты и климата Печорского угольного бассейна [17, л. 58–61]. В этот период значительный вклад в работу ВНИМС внесли А.Т.Акимов, В.М.Барыгин, В.Ф. Жуков, Ю.Т.Увар-

²⁰ Акимов Анатолий Трофимович (1917–1987), геофизик, кандидат технических наук (1952), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1937–1963 гг.

кин²¹ и др., а также исследователи из числа заключенных и бывших заключенных Воркутлага: З.Ф. Руофф²², И.В. Бойко, А.В. Голубев²³, В.В. Паладько²⁴ и др. После возвращения на станцию В.К. Яновского коллектив пополнился молодыми специалистами из числа аспирантов и кандидатов наук (Ф.Я. Новиков²⁵, Ф.Г. Бакулин²⁶ и др.).

Геофизическим направлением исследований занимался А.Т. Акимов, который начал разработку методики для разведки мерзлых грунтов, в том числе метода электроразведки. Впоследствии это направление возглавил А.В. Голубев [30], совместно с В.В. Паладько им создана аппаратура для измерения температуры грунтов электроприборами с возможностью автоматической записи результатов. В центре одного из поселков Воркутинской мульды была оборудована опытная площадка, где автоматическими приборами проводились измерения. Начались масштабные исследования в области изучения криогенного микрорельефа и его взаимосвязи с мерзлотными условиями Большеземельской тундры (И.А. Тютюнов, В.И. Яковлев²⁷, П.Д. Бондарев²⁸) [31]. Изыскания гидрологических условий Воркутинского района продолжил В.М. Барыгин. Результаты его многолетних исследований легли в основу монографии «Подземные воды Воркутского района» (1953 г.) [32]. С 1957 г. ВНИМС осуществляла работы по геокриологическому картированию шахтных полей угольных месторождений. Составлены геокриологические и инженерно-геокриологические карты шахтных полей Хальмеръюского, Юнь-Ягинского, Варгашорского-1, Усинского и др. (Ю.Т. Уваркин, Т.Ф. Иванова²⁹ и пр.) [17, л. 18–21].

В 1958 г. ВНИМС преобразована в Северное отделение Института мерзлотоведения АН СССР (с 1961 г. – Северное отделение Института мерзлотоведения Госстроя СССР). В 1964 г. отделение было передано в ведение Научно-исследовательского института оснований и подземных сооружений

(НИИОСП) Госстроя СССР³⁰. Специалисты организации на протяжении долгих лет успешно исследовали вопросы мерзлотоведения и разрабатывали способы строительства капитальных зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах, и, что наиболее важно, разрабатывали нормативные документы по проектированию, строительству и производству испытаний вечномерзлых грунтов и фундаментов. Сегодня обеспечением сохранности зданий, построенных на вечномерзлых грунтах, в Республике Коми занимается ГБУ РК «Геокриологическая служба», в основе работы которой лежат методы и разработки, созданные ВНИМС и Северным отделением НИИОСП им. Н.М. Герсевича.

Заключение

1920–1930-е гг. стали периодом рождения нового научного направления – мерзлотоведения. Эта наука дала толчок к систематическому изучению и освоению Арктики. Мерзлотные станции, которые по инициативе Академии наук СССР открывались в северных широтах, успешно решали проблемы промышленного и гражданского строительства в районах распространения вечной мерзлоты. Исследования ученых-мерзлотоведов показали, что жить и строить в условиях Арктики можно и нужно. Одной из таких организаций была Воркутинская научно-исследовательская мерзлотная станция. Учреждение сыграло ведущую роль в освоении территории европейского Северо-Востока страны. Плеяда специалистов Л.А. Братцев, В.К. Яновский, В.М. Барыгин, Д.А. Фивейский, Н.И. Салтыков и др. проводила исследования вечномерзлых грунтов на территории Печорского угольного бассейна. На основе их методик были запроектированы крупные промышленные сооружения Воркутинского района и г. Воркуты, в том числе и первая железная дорога в условиях вечной мерзлоты. История деятельности организаций, стоявших у истоков научного изучения российской Арктики, позволяет увидеть сложность и многогранность процесса освоения этого стратегического региона, что, возможно, позволит по-новому взглянуть на современные проблемы его развития.

Литература

1. *Сумгин М.И.* Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Владивосток: Дальневосточная геофизическая обсерватория, 1927. 381 с.
2. *Анисимов О.А., Григорьев М.Н., Оберман Н.Г. и др.* Оценочный отчет. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования

³⁰ В 1964–1988 гг. – Северное отделение Научно-исследовательского института оснований и подземных сооружений Госстроя СССР (НИИОСП) (с 1973 г. НИИОСП им. Н.М. Герсевича), в 1988 – 2000 гг. – Северный филиал НИИОСП им. Н.М. Герсевича, в 2000 – 2005 гг. – Северный научный центр НИИОСП им. Н.М. Герсевича. В 2005 г. организация ликвидирована.

²¹ Уваркин Юрий Тимофеевич (1929–?), кандидат географических наук (1964), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1951–1963 гг.

²² Руофф Зельма Федоровна (1897–1978), биолог, геоботаик-болотовед, доктор биологических наук (?), литературовед. В 1938 г. арестована и осуждена по 58 ст. УК РСФСР на восемь лет, отбывала заключение в Воркутлаге. После освобождения в 1946–1949 гг. работала на ВНИМС, изучала торфяные залежи и типы тундры в районе Воркуты.

²³ Голубев А.В., нет сведений.

²⁴ Паладько В.В., нет сведений.

²⁵ Новиков Федор Яковлевич (1920–1996), инженер-геолог, кандидат технических наук (1956), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1952–1963 гг.

²⁶ Бакулин Федор Григорьевич (1920–1972), геолог, кандидат геолого-минералогических наук (1954), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1952–1963 гг.

²⁷ Яковлев Владимир Иванович (годы жизни неизвестны), инженер-геолог, кандидат технических наук (1948), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР в 1940–1957 гг.

²⁸ Бондарев Петр Дмитриевич (годы жизни неизвестны), инженер-геолог, кандидат технических наук (1953), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР в 1946–1954 гг.

²⁹ Иванова Тамара Федоровна (1930–1984), инженер-геолог, кандидат геолого-минералогических наук (1956), сотрудник Института мерзлотоведения АН СССР (Госстроя СССР) в 1953–1963 гг.

- (2010). Отделение международной неправительственной некоммерческой организации «Совет Гринпис», 2010. 44 с. [Электронный документ]. URL: <http://www.green-peace.org/russia/Global/russia/report/2010/4/4607490.pdf>. (Дата обращения 10.05.2018).
3. *Оберман Н.Г.* Деградация мерзлоты в условиях глобального потепления и ее влияние на инфраструктуру в восточной части Баренцева региона. 2008. [Электронный документ]. URL: http://www.barentsinfo.fi/beac/docs/WGE_Naum_Oberman_RUS.pdf. (Дата обращения 23.05.2018).
4. *Малкова Т.А.* Научные исследования территории Республики Коми в первой половине XX в. (1901–1945 гг.). Сыктывкар: Институт языка, литературы и истории, 2008. 180 с.
5. *Документальная история* Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Коми филиал АН СССР в 1944–1964 гг. Сыктывкар, 2009. 456 с.
6. *Институт мерзлотоведения* им. В.А. Обручева АН СССР (1939–1963) / Отв. ред. акад. В.П. Мельников. Новосибирск: академическое издательство «Гео», 2007. 194 с.
7. *Воркута – город на угле*, город в Арктике / Отв. редактор-составитель д.б.н. М.В. Гецен. Сыктывкар, 2011. 512 с.
8. *Покаяние*: Мартиролог. Т. 2 / Составитель Г.В. Невский. Сыктывкар, 1999. С. 61–72.
9. *Архив Российской академии наук* (Архив РАН). Ф. 268. Оп. 1. Д. 113.
10. *Архив РАН*. Ф. 268. Оп. 1. Д. 125.
11. *Архив РАН*. Ф. 268. Оп. 1. Д. 178.
12. *Архив РАН*. Ф. 268. Оп. 1. Д. 293–294.
13. *Архив РАН*. Ф. 268. Оп. 1. Д. 352.
14. *Архив РАН*. Ф. 268. Оп. 1. Д. 361.
15. *Архив РАН*. Ф. 268. Оп. 1. Д. 379.
16. *Российский Государственный архив экономики* (РГАЭ). Ф. 82. Оп. 1. Д. 86.
17. *РГАЭ*. Ф. 82. Оп. 1. Д. 242.
18. *Воркутинский музейно-выставочный центр*. Основной фонд 2296–27–17.
19. *Воркутинский музейно-выставочный центр*. Основной фонд 2296–27–25.
20. *Государственное учреждение Республики Коми «Национальный архив Республики Коми»* (ГУ РК «НА РК»). Ф. 1675. Оп. 1. Д. 536.
21. *ГУ РК «НА РК»*. Ф. р. 1329. Оп. 1. Д. 679.
22. *Научный архив Коми НИЦ УрО РАН* (НА Коми НИЦ УрО РАН). Ф. 1. Оп. 1. Д. 110.
23. *НА Коми НИЦ УрО РАН*. Ф. 1. Оп. 1. Д. 196.
24. *Раевский С.П.* Пять веков Раевских. М.: Вагриус, 2005. 592 с. URL: <https://www.sakharov-center.ru/asfcd/auth/?t=page&num=12201>. (Дата обращения: 15.04.2018).
25. *Водолазкин В.* Яновский Владимир Константинович // Республика Коми: Энциклопедия. Т. 3. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 2000. С. 352.
26. *Подоплелов В.П., Естафьев Г.А.* Леонид Александрович Братцев (страницы биографии). Сыктывкар, 1996. 32 с.
27. *Владимир Алексеевич Кудрявцев* – основатель кафедры мерзлотоведения в Московском университете / Под ред. В.Н. Зайцева. М.: Университетская книга, 2011. 120 с.
28. *Труды Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева*. Т. 6: Проходка и крепление шахтных стволов в вечномёрзлой толще европейского Севера СССР. М., 1944. 176 с.
29. *Административно-территориальное и муниципальное устройство Республики Коми*. Издание шестое, официальное / Государственное учреждение Республики Коми «Территориальный фонд информации по природным ресурсам и охране окружающей среды Республики Коми». Сыктывкар, 2006. 278 с.
30. *Голубев А.В.* Дистанционные измерения температуры, пучения и напряжения термически деятельного слоя грунта. М.: Издательство АН СССР, 1957. 86 с.
31. *Бондарев П.Д.* Деформации зданий в районе Воркуты, их причины и методы предотвращения. М.: Издательство Академии архитектуры СССР, 1957. 98 с.
32. *Барыгин В.М.* Подземные воды Воркутинского района. М.: Издательство АН СССР, 1953. 108 с.

References

1. *Sumgin M.I.* Vechnaya merzlota pochvi v predelakh SSSR [Permafrost soils in the USSR]. Vladivostok: Far Eastern Geophysical Observatory, 1927. 381 p.
2. *Anisimov O.A., Grigoryev M.N., Oberman N.G. et al.* Ocenochnyy otchet. Osnovnie prirodnie i socialno-ekonomicheskie posledstviya izmeneniya klimata v raionakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod: prognoz na osnove sinteza nablyudenii i modelirovaniya (2010) [Assessment report. Main natural and socio-economic impacts of climate change in permafrost areas: forecast based on the synthesis of observations and modelling (2010)]. Department of the international non-governmental non-profit organization "Greenpeace Council", 2010. 44 p. URL: <http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/2010/4/4607490.pdf>. (Accessed 10.05.2018).
3. *Oberman N.G.* Degradaciya merzloty v usloviyakh globalnogo potepleniya I ee vliyanie na infrastrukturu v vostochnoi chasti Barentseva regiona [Permafrost degradation due to global warming and its impact on infrastructure in the Eastern part of the Barents region]. URL: http://www.barentsinfo.fi/beac/docs/WGE_Naum_Oberman_RUS.pdf. (Accessed 23.05.2018).
4. *Malkova T.A.* Nauchnie issledovaniya territorii Respubliki Komi v pervoi polovine XX v. (1901–1945 gg.) [Scientific research of the Komi Republic territory in the first half of the XX century (1901–1945)]. Syktyvkar: Inst. of Lang., Liter. and History. 2008. 180 p.
5. *Dokumentalnaya istoriya* Komi nauchnogo centra Uralskogo otdeleniya Rossiiskoi akade-

- mii nauk. Komi filial AN SSSR v 1944-1964 gg. [Documentary history of the Komi Science Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences. Komi Branch of the USSR Academy of Sciences in 1944-1964]. Syktyvkar, 2009. 456 p.
6. *Institut merzlotovedeniya im. V.A. Obrucheva AN SSSR (1939-1963)* [Institute of permafrost study named after V.A. Obruchev of the USSR Academy of Sciences (1939-1963)] / Ed. Acad. V.P. Melnikov. Novosibirsk: Academic Publ. "Geo", 2007. 194 p.
7. *Vorkuta - gorod na ugle, gorod v Arktike* [Vorkuta - town on the coal, town in the Arctic] / Ed.- Comp. Dr. Sci. (Biology) M.V. Getsen. Syktyvkar, 2011. 512 p.
8. *Pokayanie: Martirolog* [Repentance: The Martyrology]. Vol. 2 / Comp. G.V. Nevsky. Syktyvkar. 1999. P. 61-72.
9. *Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk* [Archives of the RAS]. F. 268. Op. 1. D. 113.
10. *Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk* [Archives of the RAS]. F. 268. Op. 1. D. 125.
11. *Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk* [Archives of the RAS]. F. 268. Op. 1. D. 178.
12. *Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk* [Archives of the RAS]. F. 268. Op. 1. D. 293-294.
13. *Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk* [Archives of the RAS]. F. 268. Op. 1. D. 352.
14. *Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk* [Archives of the RAS]. F. 268. Op. 1. D. 361.
15. *Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk* [Archives of the RAS]. F. 268. Op. 1. D. 379.
16. *Rossiiskiy gosudarstvennii arkhiv ekonomiki* [Russian State Archive of Economics]. F. 82. Op. 1. D. 86.
17. *Rossiiskiy gosudarstvennii arkhiv ekonomiki* [Russian State Archive of Economics]. F. 82. Op. 1. D. 242.
18. *Vorkutinskii muzeino-vystavochnii centr* [Vorkuta Museum and Exhibition Center]. Main fund 2296-27-17.
19. *Vorkutinskii muzeino-vystavochnii centr* [Vorkuta Museum and Exhibition Center]. Main fund 2296-27-25.
20. Gosudarstvennoe uchrezhdenie Respubliki Komi "Natsionalnii arkhiv Respubliki Komi" [State institution of the Komi Republic "National Archive of the Republic of Komi"]. F. 1675. Op. 1. D. 536.
21. Gosudarstvennoe uchrezhdenie Respubliki Komi "Natsionalnii arkhiv Respubliki Komi" [State institution of the Komi Republic "National Archive of the Republic of Komi"]. F. 1329. Op. 1. D. 679.
22. Nauchnii arkhiv Komi NTs UrO RAN [Sci. Archive of the Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS]. F. 1. Op. 1. D. 110.
23. Nauchnii arkhiv Komi NTs UrO RAN [Sci. Archive of the Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS]. F. 1. Op. 1. D. 196.
24. *Raevskiy S.P. Pyat' vekov Raevskikh* [Five centuries of the Raevsky]. Moscow: Vagrius, 2005. 592 p. URL: <https://www.sakharov-center.ru/asfcd/auth/?t=page&num=12201>. (Accessed 15.04.2018).
25. *Vodolazkin V. Yanovsky Vladimir Konstantinovich* // The Komi Republic: Encyclopedia. Vol. 3. Syktyvkar: Komi Book Publ., 2000. P. 352.
26. *Podoplelov V.P., Estafeyev G.A.* Leonid Aleksandrovich Brattsev (biography pages). Syktyvkar. 1996. 32 p.
27. *Vladimir Alekseevich Kudryavtsev - osnovatel' kafedry merzlotovedeniya v Moskovskom universitete* [Vladimir Alekseevich Kudryavtsev - founder of the Permafrost Department at Moscow University] / Ed. V.N. Zaitsev. Moscow: University Book Publ., 2011. 120 p.
28. *Trudy Instituta merzlotovedeniya im. V.F. Obrucheva. T. 6: Prokhodka i kreplenie shakhtnykh stvolov v vechnomezhloi tolsche Evropeiskogo severa SSSR* [Proc. of the Institute of permafrost named after V.A. Obruchev. Vol. 6: Sinking and fastening of mine shafts in the permafrost thickness of the European North of the USSR]. Moscow, 1944. 176 p.
29. *Administrativno-territorialnoe i municipalnoe ustrojstvo Respubliki Komi. Izdanie shestoe, oficialnoe* [Administrative-territorial and municipal structure of the Komi Republic. Edition 6, official] / Gosudarstvennoe uchrezhdenie Respubliki Komi «Territorialnyj fond informacii po prirodnym resursam i ohrane okruzhayushej sredy Respubliki Komi» [State institution of the Komi Republic "Territorial Fund of information on natural resources and environmental protection of the Republic of Komi"]. Syktyvkar, 2006. 278 p.
30. *Golubev A.V.* Distancionnye izmereniya temperatury, pucheniya i napryazheniya termicheski deyatel'nogo sloya grunta [Remote measurements of temperature, heaving and strain of the thermally active soil layer]. Moscow: USSR Ac. Sci. Publ., 1957. 86 p.
31. *Bondarev P.D.* Deformatsiya zdaniy v raione Vorkuty, ikh prichiny i metody predonvrascheniya [Deformations of buildings in Vorkuta region, their causes and methods of prevention]. Moscow: USSR Acad. of Architecture Publ., 1957. 98 p.
32. *Barygin V.M.* Podzemnie vody Vorkutinskogo raiona [Groundwaters of Vorkuta region]. Moscow: USSR Ac. Sci. Publ., 1953. 108 p.

Статья поступила в редакцию 25.06.2018.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 612.172

DOI 10.19110/1994-5655-2018-3-111-113

СЕРДЦЕ ЖАБЫ С «ДВУМЯ ЖЕЛУДОЧКАМИ»

В.А. ВИТЯЗЕВ, В.В. КРАНДЫЧЕВА, А.И. ЦВЕТКОВА

Институт физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
Vityazev.vladimir@mail.ru, As.tsvetkova@mail.ru, Game-76@mail.ru

В статье описан уникальный случай, когда из 36 пойманных в окрестности г. Сыктывкара (Россия, Республика Коми, август 2017 г.) серых жаб (*Bufo Bufo*) одна имела своеобразное строение сердца. При проведении экспериментов, после вскрытия грудной клетки, обнаружено два, тесно связанных между собой, желудочка сердца. Дополнительный желудочек проявлял электрическую активность, но в процессах желудочковой гемодинамики никак себя не проявлял. Данная информация может быть интересна для экологов, биологов и физиологов, занимающихся исследованиями сердечно-сосудистой системы.

Ключевые слова: амфибии, кардиология, сердце, желудочек, экология

V.A. VITYAZEV, V.V. KRANDYCHEVA, A.S. TSVETKOVA. A TOAD HEART WITH «TWO VENTRICLES»

The experimental animals – common toads (*Bufo bufo*) – in a total amount of 36 were collected in the vicinity of Syktyvkar (Russia, Komi Republic) during summer (August, 2017). While performing the experiments there was found a sample with two closely connected ventricles. The additional ventricle displayed electrical activity, however, it did not have any effect on ventricular hemodynamics. The data obtained may be of value to environmental scientists, biologists and physiologists involved in researches on the cardiovascular system.

Keywords: amphibians, cardiology, heart, ventricle, ecology

Введение. Трёхкамерное сердце земноводных состоит из двух предсердий и желудочка [1–4]. У жабы кровь из желудочка сердца протекает по артериям во все органы и ткани, а из них по венам оттекает в правое предсердие — это большой круг кровообращения. Кроме того, из желудочка кровь поступает в легкие и кожу, а из легких обратно в левое предсердие сердца — это малый круг кровообращения. При сокращении желудочка сначала выталкивается наименее окисленная кровь, которая посредством кожно-легочных дуг поступает к легким для газообмена (малый круг кровообращения). Кроме этого, легочные артерии посылают свои ответвления в кожу, которая также принимает активное участие в газообмене. Следующая порция смешанной крови направляется в системные дуги аорты и далее ко всем органам тела. Наиболее насыщенная кислородом кровь поступает в сонные артерии, снабжающие головной мозг. Большую роль в разделении токов крови у бесхвостых амфибий играет спиральный клапан артериального конуса.

В ходе исследований нам в руки попала жаба с двумя желудочками, показалось интересным исследовать электрическую и насосную функ-

ции желудочков у жабы с нетипичным анатомическим строением сердца.

Методы. Исследование выполнено с соблюдением принципов гуманности, изложенных в директивах Европейского сообщества (86/609/ЕЕС) и Хельсинской декларации.

Эксперимент проведён на взрослой серой жабе *Bufo Bufo* массой тела 26 г. Животное наркотизировали, помещая в емкость с 20%-ным спиртовым раствором на 3 мин. Затем ей вскрыли грудную полость и перикард. Температуру тела во время эксперимента поддерживали на уровне 24° С.

После подготовки животного регистрировали электрофизиологические и гемодинамические показатели. Проводилась запись ЭКГ от стандартных биполярных отведений. Для регистрации сердечного выброса изолировали аорту от прилегающих тканей, ультразвуковой датчик устанавливали на аорту, измеряли сердечный выброс как среднюю скорость кровотока в аорте. Регистрацию среднего давления в желудочке производили путем прямого введения катетера (через стенку) в полость желудочка. Запись гемодинамических параметров проводили с помощью системы Hugo Sachs Elektronik-

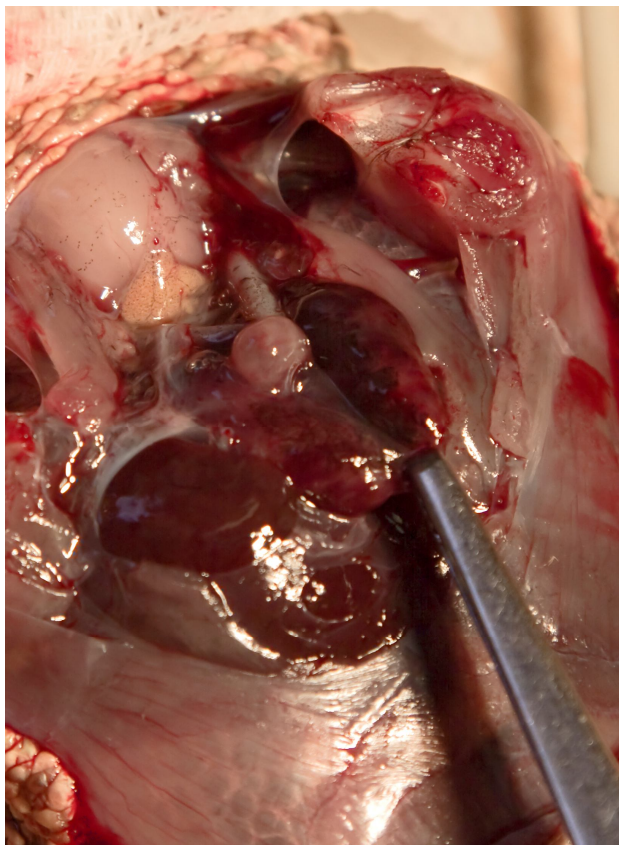


Рис.1. Сердце жабы с двумя желудочками.
Pic. 1. Toad's heart with two ventricles.

боковыми поверхностями. Они находились в единой перикардиальной сумке.

На рис. 2 представлены синхронные записи ЭКГ, сердечного выброса, внутрижелудочкового давления. Расширенный комплекс QRS имеет два положительных отклонения. Повышение внутрижелудочкового давления и изгнание крови совпадают с первым положительным пиком комплекса QRS. Для сравнения ЭКГ нормального сердца жабы выглядит следующим образом: комплексу QRS предшествует положительная P-волна, сам комплекс QRS имеет один положительный пик, фазу реполяризации отражает положительная T-волна.

Заключение. Таким образом, можно сказать, что в сердце жабы с двумя желудочками, один из них является основным, который выполняет нагнетательную функцию, а второй – придаток, проявляющий некоторую электрическую активность (второе положительное отклонение комплекса QRS), но не несёт за собой никакой функциональной нагрузки (повышение давления, изгнание крови).

Литература

1. Davies F., Francis E.T. The conducting system of the vertebrate heart // Biol Rev Camb Philos Soc. 1946; 21 (4): P.173–188.
2. Moorman A.F., Christoffels V.M. Cardiac chamber formation: development, genes, and evolution // Physiol Rev. 2003; 83(4): P.1223–1267.
3. Sedmera D., Reckova M., deAlmeida A., Sedmerova M. et al. Functional and morphological evidence for a ventricular conduction system in

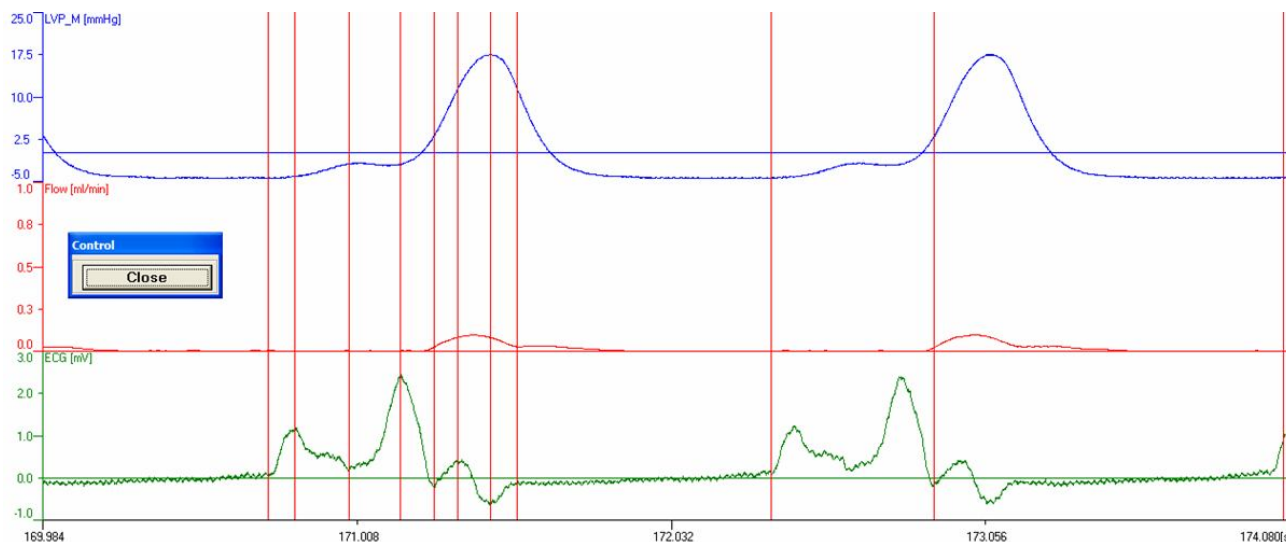


Рис.2. Синхронная запись ЭКГ (I отведение), сердечного выброса и давления в желудочке.
Pic. 2. Simultaneous ECG recording (I lead), cardiac output and ventricular pressure.

Harvard Apparatus (March-Hugstetten, Germany). Все показатели регистрировали синхронно [5].

Результаты и обсуждение. Во время проведения эксперимента, после вскрытия грудной клетки животного, было обнаружено сердце с двумя полностью сформированными желудочками. На рис. 1 видны два желудочка, соединенные вместе

zebrafish and Xenopus hearts // Am J Physiol. Heart Circ Physiol. 2003; 284 (4): P.1152–1160.

4. Jensen J., Wang T., Christoffels V.M., Moorman A.F. Evolution and development of the building plan of the vertebrate heart // Biochem Biophys Acta. 2013; 1833(4): P.783–794.

5. *Насосная функция желудочка лягушек при эктопическом возбуждении* / Н.А. Киблер, А.С. Белоголова, М.А. Вайкшнорайте, Я.Э. Азаров, Д.Н. Шмаков // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2008. №2. С. 176–183.

References

1. *Davies F., Francis E.T.* The conducting system of the vertebrate heart // Biol. Rev. Camb. Philos. Soc. 1946; 21 (4): P.173–188.
2. *Moorman A.F., Christoffels V.M.* Cardiac chamber formation: development, genes, and evolution // Physiol. Rev. 2003; 83(4): P.1223-1267.
3. *Sedmera D., Reckova M., deAlmeida A., Sedmerova M. et al.* Functional and morphological evidence for a ventricular conduction system in zebrafish and *Xenopus* hearts // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 2003; 284 (4): P.1152–1160.
4. *Jensen J., Wang T., Christoffels V.M., Moorman A.F.* Evolution and development of the building plan of the vertebrate heart // Biochem. Biophys. Acta. 2013; 1833(4): P.783–794.
5. *Kibler N.A., Belogolova A.S., Vaikshnoraitė M.A., Azarov Ya.E., Shmakov D.N.* Nasosnaya funkciya zheludochka lyagushek pri ektopicheskom vozbyzhdenii [Ventricular pump function under ectopic excitation of the frog heart] // Sechenov Physiology J., 2008, No. 2. P.176–183.

Статья поступила в редакцию 20.05.2018.

Х ВСЕРОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ ПО ИСТОРИЧЕСКОЙ ДЕМОГРАФИИ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ) Сыктывкар, 27–30 июня 2018 г.

В Сыктывкаре с 27 по 30 июня 2018 г. прошел X Всероссийский симпозиум по исторической демографии (с международным участием) «Этнодемографический фактор в освоении и развитии Арктики и субарктической зоны: исторический опыт и перспективы». Организаторами симпозиума выступили: Институт языка, литературы и истории Коми НЦ УрО РАН, Министерство национальной политики Республики Коми, Институт истории СО РАН, Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми НЦ УрО РАН, Северная секция Научного совета РАН по исторической демографии и исторической географии, Коми региональное отделение Российского исторического общества, Коми отделение Санкт-Петербургской арктической академии наук. На симпозиум было подано более 80 заявок учеными из Словакии, Республики Беларусь, Казахстана, Молдовы, российскими исследователями из Москвы, Санкт-Петербурга, Владивостока, Ижевска, Иркутска, Вологды, Ростова-на-Дону, Екатеринбургa, Минусинска, Перми, Оренбурга, Сухуми (Абхазия), Новосибирска, Оренбурга, Ухты.

Работу симпозиума открыл 28 июня в зале заседаний Коми научного центра директор ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН, д.и.н. И.Л. Жеребцов, который отметил важность межрегионального и международного сотрудничества в изучении северных территорий, их освоения и развития. Заместитель директора по научной работе ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, к.и.н. А.В. Самарин в приветствии отметил, что активное изучение демографических процессов и проведение демографических форумов говорит о том, что в Институте языка, литературы и истории сложилась научная школа по исторической демографии под руководством И.Л. Жеребцова. Представитель Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева (Астана, Казахстан), д.и.н., проф. Т.С. Садыков в приветственном



Президиум симпозиума: слева направо А.В. Самарин, И.Л. Жеребцов, Т.С. Садыков, Н.М. Игнатов.
Выступают: Д.А. Редин, Е.Т. Артёмов.

выступлении сказал: «Именно ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН является истинным центром изучения исторической демографии Евразийского пространства, это изучение происходит в сотрудничестве с разными странами, в том числе с Казахстаном. Мы делаем общее дело – развиваем новые направления изучения историко-демографических процессов». Далее с приветственным обращением выступили д.и.н. Е.Т. Артёмов, председатель Ученого совета Института истории и археологии УрО РАН и д.и.н. Д.А. Редин, и.о. директора Института истории и археологии УрО РАН из Екатеринбурга. Они отметили, что ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН и ИИА УрО РАН «близкие научные партнеры», которые занимаются и в том числе проблемами исторической демографии. Д.А. Редин также обратил внимание на то, что издаваемый в ИЯЛИ

научный журнал «Историческая демография», рассматривает процессы исторической демографии «в широком хронологическом ракурсе с XVIII по XXI вв., что очень важно». Завершились приветствия выступлением заведующего отделом гуманитарных исследований Южного НЦ РАН, д.и.н. Е.Ф. Кринко (Ростов-на-Дону), который отметил высокий научный уровень ежегодных симпозиумов по исторической демографии, проводимых Институтом языка, литературы и истории, а также высказал мнение о том, что процессы в арктических регионах следует изучать, в том числе в сравнительном ракурсе «Север–Юг».

Научная программа заседаний симпозиума включала доклады, посвященные истории и перспективам развития северных территорий (д.э.н. В.В. Фаузер, к.с.н. Т.С. Лыткина, Сыктывкар), проблеме новых источников (Р.П. Биланчук, Вологда), возвратной миграции старообрядцев из Южной

Америки в Приморье (д.и.н. Ю.В. Аргудяева, Владивосток), военной демографии (д.и.н. Е.Ф. Кринко, Е.М. Горюшина, Ростов-на-Дону), развитию семейно-брачных отношений (д.э.н. Л.А. Попова, Сыктывкар) и др. Исследователь из Словакии, д-р философии М. Шмигель озвучил доклад участника симпозиума М. Сырны (д-р философии, Банска Быстрица, Словакия), посвященного государственной политике в отношении немецких и венгерских меньшинств в Чехословакии/Словакии после Второй мировой войны. Также в рамках научной программы состоялось заседание круглого стола «Историографические аспекты освоения и развития Арктики и Субарктики: опыт, достижения, перспективы». Помимо научной дискуссии участники симпозиума поздравили И.Л. Жеребцова с 35-летием творческой деятельности, отметили его высокие достижения и заслуги в научной и просветительской деятельности. Заместитель председателя Государственного Совета Республики Коми В.В. Жиделева вручила памятную медаль «80 лет Государственному Совету Республики Коми» и приветственный адрес. Также прозвучали поздравления от руководителей ВУЗов, научных институтов ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, общественных организаций.

В рамках работы симпозиума прошло заседание двух круглых столов. Выездной круглый стол состоялся 29 июня (с. Ыб, Сыктывдинский р-н, Финно-угорский этнопарк). Иногородние и зарубежные участники посетили с экскурсией старинное коми село и историко-краеведческий музей. На круглом столе были обсуждены положения, высказанные в докладах депутата Государственной Думы РФ, научного руководителя Удмуртского института истории, языка и литературы УрО РАН, д.и.н. А.Е. Загребина и директора ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН, д.и.н. И.Л. Жеребцова «Методологичность источника и/или методичность исследователя (К вопросу о концептуальных основах исторической демографии)» и др. Также 30 июня состоялся круглый стол «Историко-демографические исследования в Республике Коми в XX – начале XXI в.: этапы, итоги, перспективы (к 97-летию Республики Коми)».

В рамках четырех заседаний симпозиума, прошедших в ИЯЛИ 29 июня, заслушано 15 докладов ученых из Сыктывкара и представлено 25 постер-докладов, в том числе иногородних и зарубежных участников. В ходе заседаний были рассмотрены вопросы освоения и модернизации северных территорий (д.и.н. М.А. Мацук, д.и.н. Э.А. Савельева, д.и.н. А.К. Гагиева), процессы урбанизации в субарктических регионах в середине XX в. (к.и.н. Н.А. Нисковский). Широкий анализ смертности населения европейского Северо-Востока России в конце XIX – начале XX вв. был представлен в докладе к.и.н. Д.В. Вишняковой.

Отдельное заседание было посвящено проблеме, традиционно рассматриваемой на демографическом симпозиуме, интерпретации источников и анализу новых источников по исторической демографии. Состоялась активная дискуссия, в рамках которой обсуждались верификация опубликованных источников и проблемы анализа первичных документов. Как новый комплекс источников по изучению грамотности населения были представлены списки должностных лиц волостных и сельских правлений Вологодской губернии XIX в. (к.и.н. С.А. Попов). Интерес вызвал доклад об опубликованном документе XIX в. «Военно-статистическое обозрение Российской империи» (к.и.н. И.И. Лейман). Было заслушано выступление о памятных книжках XIX в. как историческом источнике (А.В. Бирюков). Также были представлены доклады об особенностях статистического учета в советский период верующих (к.и.н. В.В. Власова) и спецпереселенцев (к.и.н. Н.М. Игнатова), влиянии питания населения на демографическую динамику (д.и.н. В.В. Муравьев), отражении миграционных процессов в фольклорных произведениях (к.и.н. Н.С. Коровина) и др.

К началу работы симпозиума выпущен сборник научных статей «Динамика численности городского и сельского населения России» (Сыктывкар, 2018. 160 с.) в серии «Демографическая история России и регионов» (предыдущие выпуски серии изданы в Новосибирске и Екатеринбурге). Авторами сборника рассмотрены вопросы историографии демографических процессов, миграционные процессы, проблемы формирования и динамики населения, особенности брачной структуры населения и трансформации семьи в исторической ретроспективе с XVII по XXI вв.

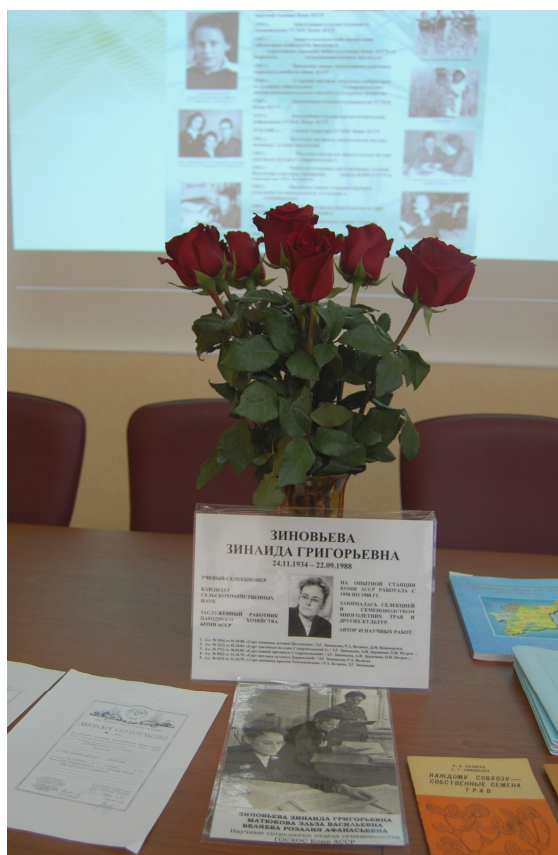


Участники симпозиума в зале заседаний.
На переднем плане М. Шмигель, М. Сырны, Д.В. Вишнякова.

*к.и.н., зав. сектором историко-демографических
и историко-географических исследований Российского Севера
Института языка, литературы и истории ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Н.М. Игнатова*

«СЕЛЕКЦИОНЕР МИЛОСТЬЮ БОЖЬЕЙ»

Памяти Зинаиды Григорьевны Зиновьевой
(24.11.1934 – 22.09.1988)



25 сентября 2018 г. состоялось заседание Ученого совета Института сельского хозяйства Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», посвященное памяти заслуженного работника народного хозяйства Коми АССР, ученого-селекционера, кандидата сельскохозяйственных наук **Зинаиды Григорьевны Зиновьевой**.

Открыл заседание Ученого совета врио директора ИСХ Коми НЦ УрО РАН А.А. Юдин, который рассказал о трудовом пути З.Г. Зиновьевой и ее вкладе в отечественную сельскохозяйственную науку. Врио директора ФИЦ Коми НЦ УрО РАН В.В. Володин в своем выступлении остановился на основных вехах биографии Зинаиды Григорьевны. Также своими воспоминаниями о жизненном и творческом пути ученого-селекционера поделились близкие друзья и коллеги: Р.А. Беляева, Г.Т. Шморгунов, В.С. Матюков и другие. В памяти всех присутствующих Зинаида Григорьевна остается удивительно деятельным, добросердечным и оптимистичным человеком, уникальным профессионалом своего дела.

З.Г. Зиновьева родилась 24 ноября 1934 г. в г.Сыктывкаре. Окончила среднюю школу № 2 с золотой медалью. В 1958 г. с красным дипломом окончила Московскую сельскохозяйственную академию им. К.А. Тимирязева. С оценкой «отлично» защитила диплом на тему «Влияние длины дня и количества света на рост и развитие яровой пшеницы Московка и пшениц-двуручек». Начиная с 1958 г., на протяжении 30 лет работала на Государственной опытной станции Коми АССР им. А.В. Журавского. Диссертационную работу об осо-

бенностях биологии и агротехники кормовых бобов в условиях Коми АССР защитила в 1967 г. На формирование ее научного мировоззрения большое влияние оказал чл.-корр. АН СССР, академик ВАСХНИЛ П.П. Вавилов, в те годы работавший председателем Президиума Коми филиала АН СССР.

Всю свою жизнь З.Г.Зиновьева посвятила развитию сельскохозяйственной науки в Коми республике, созданию новых сортов многолетних трав с устойчивой кормовой и семенной продуктивностью, приспособленных к суровым условиям Севера.

Важнейшей частью ее научно-исследовательской работы являлись селекция и семеноводство, а в качестве исходного материала ею широко использовались местные дикорастущие популяции, сложившиеся в процессе жесткого естественного отбора в северных широтах и отличающиеся зимостойкостью, скороспелостью и продолжительным жизненным циклом. Полученные научные данные по биотическому разнообразию дикорастущих популяций овсяницы луговой, овсяницы красной, мятлика лугового, костра безостого и клевера красного, созданные сорта многолетних трав и межродовых гибридов пшеницы и ржи вносят существенный вклад в популяционную биологию и прикладную ботанику в развитие проблематики и представлений о местном сорте, ускоренном искусственном отборе и микроэволюции в агроценозах. Для такой работы Зинаида Григорьевна имела все данные: высокую квалификацию, смелость научных суждений, тщательность в постановке научных экспериментов, а также характер, волю и самоотверженность.

Перу З.Г.Зиновьевой принадлежит 39 научных работ, она является автором ряда сортов многолетних кормовых трав и тритикале, полученных методом отдаленной гибридизации ржи и пшеницы. Работы ее в области селекции, семеноводства и агротехники многолетних трав известны специалистам в стране и за рубежом.

За заслуги в развитии сельскохозяйственной науки Зинаиде Григорьевне Зиновьевой присвоено звание заслуженного работника народного хозяйства Коми АССР, она награждена медалью «Ветеран труда», знаками «Изобретатель СССР» и «Отличник сельского хозяйства РСФСР», Почетными грамотами ВАСХНИЛ, Верховного Совета Коми АССР и Сыктывкарского горкома КПСС. За создание сорта овсяницы луговой Цилемская она награждена Серебряной медалью ВДНХ СССР (в соавторстве с Р.А.Беляевой).



Участники заседания Ученого совета.

Слева направо: 1 ряд: И.С. Сюрвасева, Г.Т. Шморгунов, В.М. Швецова, Р.А. Беляева;
2 ряд: Е.В. Казаков, Т.П. Казакова, Т.В. Шитова, Т.И. Кожемякина, В.В. Володин, Э.В. Матюкова, Н.В. Регорчук, Н.В. Володина;
3 ряд: В.Е. Казаков, Т.В. Тарабукина, Н.Н. Сокерина, В.А. Яковлева, Е.В. Чередова, Т.В. Косолапова, В.С. Матюков.

Еще не одно поколение селекционеров и агрономов будет руководствоваться научными трудами одной из первых женщин-селекционеров Республики Коми З.Г.Зиновьевой на благо развития северного растениеводства и селекции.

Память о талантливой женщине, удивительном человеке, Зинаиде Григорьевне, будет жить в ее многочисленных работах, в сердцах коллег и друзей.

АСХАБ МАГОМЕДОВИЧ АСХАБОВ



17 августа 2018 г. исполнилось 70 лет выдающемуся ученому и признанному специалисту в области теоретической и экспериментальной минералогии, минералогической кристаллографии и кристаллогенезиса, главному научному сотруднику лаборатории экспериментальной минералогии Института геологии Коми научного центра УрО РАН, профессору, академику **Асхабу Магомедовичу Асхабову**.

Асхаб Магомедович родился в Дагестане в с.Хуштада Цумадинского района. В 1966 г. с серебряной медалью окончил среднюю школу №18 г. Воркуты и поступил в Пермский государственный университет. В 1968 г. перевёлся в Дагестанский государственный университет, который закончил в 1971 г. по специальности «физика». Трудовую деятельность начал школьным учителем в Воркуте. В Институте геологии Коми научного центра УрО РАН работает с 1972 г., где прошел путь от старшего лаборанта до директора. В 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1989 г. – докторскую. В 1994 г. присвоено звание профессора по специальности «физическая химия». В 1997 г. избран членом-корреспондентом РАН, а в 2011 г. – академиком РАН. С мая 2006 г. по апрель 2016 г. – председатель Президиума Коми научного центра УрО РАН, с февраля 2008 г. по декабрь 2017 г. – директор Института геологии Коми научного центра УрО РАН.

А.М. Асхабов – известный ученый, специалист в области минералогии, кристаллографии, кристаллогенезиса, наноминералогии.

Трудами Асхаба Магомедовича внесен крупный вклад в минералогическую кристаллографию и кристаллогенезис, экспериментальное моделирование минералообразующих процессов, в развитие научных основ технологий синтеза искусственных минералов и получения новых материалов, в теорию и практику наноминералогии. На базе многолетних экспериментальных исследований ученый получил принципиально новые данные о процессах и механизмах кристаллообразования, о влиянии различных факторов на морфологию и рост кристаллов, на их строение и свойства. Им заложены основы нового эволюционного направления в кристаллогенезисе, в котором развиваются представления об организующей роли кристалла в ростовом процессе, о детерминированности особенностей роста кристалла не только его структурой и параметрами среды, но и факторами, генерированными самим растущим кристаллом. Показана роль эндогенных факторов, дис-

сипативных структур и явлений самоорганизации в процессах кристаллогенезиса.

Значительный вклад А.М. Асхабов внес в раскрытие закономерностей и условий природного кристаллообразования, в проблему генетической интерпретации характеристик роста кристаллов. Он разработал новые морфологические, анатомические и кристаллофизические индикаторы генезиса алмаза, кварца, берилла и других минералов, выявил новые типы геохимических барьеров в виде плотностных градиентных зон в минералообразующих средах. В технологии выращивания искусственных кристаллов широко применяются установленные ученым закономерности роста и формирования кристаллов на стадии регенерации, предложенные им новые методы управления ростом кристаллов, регулирования их свойств. Под его руководством в институте в практику кристаллогенетических исследований внедрены новейшие методы голографической интерферометрии, атомно-силовой микроскопии и компьютерного моделирования.

К числу крупных научных достижений А.М. Асхабова относится разработка оригинальной кватаронной концепции конденсации минерального вещества, основанной на открытых им закономерностях кластерной самоорганизации вещества на наноуровне. Эта концепция имеет фундаментальное значение для решения ключевых проблем реального кристаллообразования, интерпретации морфологических и структурных особенностей наноструктур и наноиндивидов, понимания свойств и особенностей протоминерального мира, развития перспективных направлений нанотехнологии. В рамках кватаронной концепции созданы новые теоретические модели зарождения и роста кристаллов, формирования некристаллических материалов. На ее основе разрабатываются новые методы получения кристаллов, ультрадисперсных материалов, новых видов наноструктурированных веществ, предложены кватаронные модели образования шаровой молнии и происхождения жизни. На Международной конференции по росту кристаллов в Пекине в 2010 г. доклад А.М. Асхабова, в котором излагались основные идеи кватаронной концепции, был признан лучшим.

А.М. Асхабов ведет большую научно-организационную и общественную работу, руководит рядом научных программ, проектов и тем. В течение 10 лет он возглавлял Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук и Институт геологии. За эти годы проведена огромная работа по сохранению и развитию научного потенциала Республики Коми, по формированию в Сыктывкаре Федерального исследовательского центра. Академик А.М. Асхабов является членом различных научных обществ, в том числе

зарубежных, руководителем или членом ряда общественных и просветительских организаций, входит в состав правительственных комиссий Республики Коми по науке и инновациям. Он является членом Президиума УрО РАН, председателем Сыктывкарского отделения Российского минералогического общества, главным редактором двух научных журналов. Много лет был членом Бюро Отделения наук о Земле РАН. С 2013 г. по 2018 г. Асхаб Магомедович – сопредседатель Коми регионального отделения Общероссийского народного фронта и руководитель республиканского отделения Русского географического общества.

При непосредственном участии и под руководством А.М. Асхабова в Сыктывкаре проведены крупные совещания и семинары с международным участием по теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии, кристаллографии и кристаллогенезису, наноминералогии, а с 2013 г. проводятся регулярные Юшкинские чтения. Ученый активно участвует в подготовке научных кадров. Он возглавляет основанную академиком Н.П. Юшкиным кафедру геологии в Сыктывкарском государственном университете. Читает курсы лекций по актуальным проблемам минералогии, кристаллографии, нанотехнологии в вузах и научных учреждениях страны. Им подготовлено восемь кандидатов и два доктора наук.

Он автор более 440 научных работ, среди которых свыше двух десятков монографий и отдельных изданий, включая учебные пособия для

ВУЗов. Его исследования по ряду направлений кристаллогенетической науки – по физике растущего кристалла, теории ростовой эволюции системы «кристалл–среда», количественной кинетике кристаллогенезиса, кластерному росту кристаллов и др. – являются пионерскими, вошли составной частью в учебники для вузов, получили широкую известность. Им создана научная школа по исследованию процессов кристаллообразования на микро- и наноуровне, которая в 2012 г. признана ведущей научной школой России.

С 2010 г. академик А.М. Асхабов является главным редактором научного журнала «Известия Коми НЦ УрО РАН».

А.М. Асхабов – лауреат премии Коми комсомола (1977 г.) и премии АН СССР и Болгарской АН за лучшие совместные исследования (1986 г.). Награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени. В 1998 г. ему присвоено звание «Заслуженный работник Республики Коми», а в 2007 г. он удостоен Государственной премии Республики Коми в области науки. В 2009 г. награжден орденом Дружбы. В 2013 г. А.М. Асхабову присвоено звание «Почетный деятель науки Республики Коми».

Сердечно поздравляем Асхаба Магомедовича с юбилеем и желаем ему здоровья и творческого долголетия!

*Коллектив Института геологии
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Редколлегия*

СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА ДЁГТЕВА



21 сентября 2018 г. отметила свой юбилей доктор биологических наук, Почетный деятель науки Республики Коми, Отличник охраны природы России, Почетный эколог Республики Коми, лауреат Премии Главы Республики Коми и Премии Правительства Республики Коми в области научных исследований, руководитель Института биологии

Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук **Светлана Владимировна Дёгтева**.

С.В. Дёгтева родилась в 1958 г. в г. Сыктывкаре. В 1975 г. успешно окончила среднюю школу №4 г. Сыктывкара, в 1980 г. с отличием – химико-биологический факультет Сыктывкарского государственного университета им. 50-летия СССР, в 1984 г. – аспирантуру при биолого-почвенном факультете Ленинградского государственного государственного университета. В Институт биологии Коми филиала АН СССР Светлана Владимировна была принята на работу в феврале 1985 г. на должность научного сотрудника лаборатории геоботаники и систематики растений. В этом же году блестяще защитила кандидатскую диссертацию «Сероольшаники Северо-Запада европейской

части РСФСР». В 1989 г. назначена исполняющей обязанности заведующей вновь организованной лаборатории луговедения и рекультивации, а в 1990 г. – отделом геоботаники и рекультивации. В 2002 г. защитила докторскую диссертацию по теме «Лиственные леса подзон южной и средней тайги Республики Коми». С 2005 по 2010 гг. являлась заместителем директора по научным вопросам Института биологии Коми НЦ УрО РАН, с 2010 г. – директор Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

С.В. Дёгтева – крупный ученый в области геоботаники, лесной типологии, охраны и рационального использования природных ресурсов.

Многие годы Светлана Владимировна с коллегами проводит исследования растительного покрова на территориях Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника и национального парка «Югыд ва». В ее работах представлена классификация растительного покрова в ландшафтах Северного (бассейн верхней и средней Печоры) и Приполярного (бассейн р.Косью) Урала. В сфере научных интересов – вопросы динамики растительности, она выявила особенности естественного восстановления растительных сообществ при промышленной деятельности на Приполярном Урале, закономерности смен лесных фитоценозов на вырубках и гарях в подзонах южной и средней тайги Республики Коми.

Объекты ее исследований – растительные сообщества, являющиеся каркасом большинства экосистем, поэтому без знаний об их устройстве и функционировании невозможна организация природоохранной деятельности. С.В. Дёгтева на протяжении многих лет курирует научное обеспечение природоохранной работы в Республике Коми. Она внесла значительный вклад в развитие сети особо охраняемых природных территорий республики. В 1995 г. С.В. Дёгтевой в соавторстве с А.И. Таскаевым, Р.Н. Алексеевой, В.П. Гладковым опубликована карта «Охраняемые природные территории Республики Коми» (М 1:1200000). С 2000 г. сотрудники Института биологии Коми НЦ УрО РАН под руководством С.В. Дёгтевой реализуют программу комплексных исследований, направленную на инвентаризацию и мониторинг биологического разнообразия особо охраняемых природных территорий на ценотическом, видовом и популяционном уровнях. Светлана Владимировна курирует ведение и издание «Красной книги Республики Коми». Результаты этих изысканий были отражены в серии монографий «Биологическое разнообразие особо охраняемых природных территорий Республики Коми» (отв. редактор С.В. Дёгтева) и переданы в виде научных отчетов в Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, а также активно используются при подготовке законодательных актов, государственных докладов «О состоянии окружающей природной среды Республики Коми» и в Республиканском центре обеспечения функционирования особо охраняемых природных территорий и природопользования. Высоко востребованное в нашем регионе и за его пределами второе издание «Кадастра особо охраняемых природных территорий Республики Коми», подготовленное под руководством С.В. Дёгтевой, было удостоено Премии Правительства Республики Коми.

Светлана Владимировна имеет большой опыт научно-организационной работы. Под ее руководством реализованы крупные комплексные проекты по программам РАН, УрО РАН, РФФИ, государственные контракты с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, она принимала участие в выполнении научных исследований, поддержанных международными грантами, в том числе финансируемых по программам Европейского Союза, ГЭФ-ПРООН. Она уделяет большое внимание внедренческим работам, была ответственным исполнителем работ по хозяйственным договорам, направленным на мониторинг воздействия промышленной деятельности на растительный покров, создание электронных кадастров редких и лекарственных растений, особо охраняемых природных территорий. Постоянно поддерживает тесные деловые контакты с законода-

тельными и исполнительными органами Республики Коми и Российской Федерации, природоохранными общественными организациями. С.В. Дёгтева – председатель Ученого совета ИБ Коми НЦ УрО РАН, член Объединенного ученого совета по биологическим наукам УрО РАН, зам. председателя диссертационного совета Д 004.007.01 по защите докторских диссертаций в ИБ Коми НЦ УрО РАН, член коллегии Минприроды Республики Коми, член Совета по Арктике УрО РАН, председатель Коми отделения Русского ботанического общества. Является главным редактором журнала «Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН», входит в состав редакционных коллегий научных рецензируемых журналов «Растительность России», «Известия Коми НЦ УрО РАН», «Известия Карельского научного центра РАН», «Теоретическая и прикладная экология», «Аграрная наука Евро-Северо-Востока».

С.В. Дёгтева автор и соавтор свыше 260 научных работ, в том числе 20 монографий. Под ее руководством защищены кандидатские диссертации.

В коллективе, руководимом С.В. Дёгтевой, успешно сохраняются и развиваются те лучшие традиции, сформированные в Институте биологии ее предшественниками. Для повышения уровня научных исследований в течение последних лет был создан центр коллективного пользования «Молекулярная биология», оборудованы современные лаборатории для проведения исследований в областях генетики и физиологии растений, приобретено дорогостоящее импортное оборудование, развивалась сеть объектов постоянного мониторинга. Сотрудники участвуют в программах мобильности молодых ученых, в институте проходят стажировки начинающие исследователи из научных учреждений и высших учебных заведений России и зарубежных стран. На базе института регулярно проводятся научные мероприятия: конференции, симпозиумы, семинары, специалисты выезжают для апробации полученных результатов на научные форумы, в том числе в другие страны. Продолжают развиваться международное сотрудничество, патентная работа, выставочная деятельность. Институт биологии Коми НЦ УрО РАН в период руководства С.В. Дёгтевой дважды проходил оценку результативности деятельности, и ему дважды была присвоена высшая (первая) категория.

Искренне и от всей души поздравляем Светлану Владимировну со знаменательной датой. Желаем только хороших новостей на работе и дома, крепкого здоровья, сохранения несгибаемой воли и изумительной работоспособности! *A probis probari, ab improbis improbari aequa laus est!*

Коллектив Института биологии
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Редколлегия

ПОТЕРИ



12 августа 2018 г. на 67-м году ушел из жизни доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации

ИВАН НИКОЛАЕВИЧ АНДРОНОВ

И.Н. Андронов родился 11 июня 1952 г. в с. Семьинском Юрьев-Польского района Владимирской области. После окончания восьмого класса поступает в физико-математический интернат № 18 при МГУ (школа им. академика А.Н. Колмогорова). Эта школа стала первой ступенью на пути к становлению учёного-физика. В 1977 г. после окончания Горьковского государственного университета приезжает в Ухту и устраивается на работу в Ухтинский индустриальный институт. С 1979 по 1982 гг. обучается в очной аспирантуре математико-механического факультета Ленинградского государственного университета. Своё диссертационное исследование он готовит, работая в лаборатории прочности

материалов под руководством проф. В.А. Лихачёва, ученика советского академика Н.Н. Давиденкова. Именно тогда Иван Николаевич начал заниматься исследованием материалов с эффектом памяти формы, которому посвятил всю свою дальнейшую жизнь и к которому привлек многих молодых исследователей. В 1982 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Обратимая память формы медномарганцевых композиций», в которой была начата разработка методов термосилового воздействия на материалы с памятью формы с целью эффективного управления их деформационными и энергетическими характеристиками при сложном напряжённом состоянии.

Под руководством Ивана Николаевича в УГТУ организована научно-педагогическая школа «Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование физико-механических систем в рамках механики сплошных сред». Будучи физиком по образованию, он обладал широким спектром знаний, и это помогало ставить задачи и проводить экспериментальные исследования в различных областях. Ученый обладал фундаментальными знаниями в области механики деформируемого твердого тела и являлся в этой области грамотным теоретиком. Он сплотил вокруг себя большой коллектив исследователей. Были сконструированы и внедрены уникальные экспериментальные установки, на которых проводились исследования проволоки, сплошных и полых образцов из сплавов с памятью формы (например, никелида титана, медномарганцевых композиций, композиционных материалов) и металлов (медь, цинк, алюминий, сталь).

В 1999 г. Иван Николаевич защитил докторскую диссертацию. В том же году возглавил кафедру сопротивления материалов и деталей машин Ухтинского государственного технического университета. В 2006–2012 гг. он работал проректором по научной работе УГТУ. В это время в университете были открыты аспирантура по физико-математическому направлению (специальность 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела), региональный инновационный научно-образовательный центр, экспертно-аналитический отдел по конкурсам проектов и грантов.

И.Н. Андронов – автор идеи и на протяжении многих лет бессменный модератор межрегионального вебинара «Актуальные вопросы транспорта нефти и газа», проводимого каждый месяц учебного года. Вебинар стал уникальной информационной площадкой для обсуждения научных результатов работ студентов, аспирантов, соискателей ведущих вузов из Ухты, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Самары, Орла.

Научные разработки ученого нашли отражение более чем в 200 публикациях и 13 запатентованных свидетельствах на изобретения. Под его руководством подготовили и защитили диссертации свыше 15 аспирантов и соискателей. И.Н. Андронов являлся членом докторского диссертационного совета Д.212.291.01, действительным членом Российской академии естественных наук, членом экспертного совета ВАК. Он был удостоен нагрудного знака «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», Почетной грамоты администрации МО «Город Ухта» за многолетний добросовестный труд, Почетной грамоты Коми НЦ УрО РАН за выдающийся вклад в укрепление сотрудничества Коми научного центра и Ухтинского университета. За заслуги в научно-педагогической деятельности и большой вклад в подготовку квалифицированных специалистов И.Н. Андронову присвоено высокое звание «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации».

И.Н. Андронов в полной мере реализовался и как университетский профессор. За сорок лет работы в УГТУ он стал проводником в сложный мир современной теоретической механики и сопромата для тысяч студентов. Он очень любил свою семью, супругу Валентину Егоровну, сыновей Николая и Илью. Оба сына окончили Московский физико-технический институт.

Первоклассный ученый, давший путевку в серьезную науку большой когорте молодых исследователей, Иван Николаевич навсегда пребудет одним из тех атлантов, чей интеллектуальный труд обеспечил УГТУ прочные позиции в науке и системе образования. Уход из жизни И.Н. Андронova – потеря невосполнимая, но память о нем останется призывом к неустанным трудам ума и души каждого, кто его знал. Светлая память Ивану Николаевичу Андронову.

Коллектив УГТУ, редколлегия

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ
журнала «Известия Коми НЦ УрО РАН»

Журнал публикует научно-аналитические обзоры (объем до 1,5 печ.л.), оригинальные статьи (до 0,8 печ.л) и краткие сообщения (до 0,3 печ.л.) теоретического и экспериментального характера по проблемам естественных, технических, общественных и гуманитарных наук, в том числе региональной направленности. Статьи должны отражать результаты законченных и методически правильно выполненных работ. К публикации также принимаются комментарии к ранее опубликованным работам, информация о научных конференциях, рецензии на книги, хроника событий научной жизни.

Направляя статью в наш журнал, Вы соглашаетесь с нашим **Положением о публикационной этике журнала** (на сайте журнала). Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала после рецензирования, учитывая новизну, научную значимость и актуальность представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не рассматриваются.

Общие требования к оформлению рукописей

Статьи должны сопровождаться направлением научного учреждения, где была выполнена работа. В необходимых случаях должно быть приложено экспертное заключение. Организация, направляющая статью, как и автор(ы), несет ответственность за её научное содержание, достоверность и оригинальность приводимых данных. Изложение материала статьи должно быть ясным, лаконичным и последовательным. Статья должна быть подписана всеми авторами (автором) с указанием (полностью) фамилии, имени, отчества, домашнего адреса, места работы, служебного и сотового телефонов и e-mail.

В редакцию подается рукопись статьи в двух экземплярах – на бумаге и на диске в редакторе WinWord под Windows. Математические статьи могут подаваться в редакторе TEX. Электронная и бумажная версии статьи должны быть идентичны. Электронный вариант рукописи может быть прислан по электронной почте на адрес редакционной коллегии: journal@frc.komisc.ru. Текст должен быть набран на компьютере (шрифт Times New Roman, кегль 14) в одну колонку через 1,5 интервала на бумаге форматом А4. По всей статье шрифт должен быть одинаковым. Поля страниц оригинала должны быть не менее: левое – 25 мм, верхнее – 20 мм, правое – 10 мм, нижнее – 25 мм. Количество иллюстраций (таблицы, рисунки, фото) в статье не должно превышать 5–7 шт., количество иллюстраций в кратких сообщениях – 2–3 шт.

Первая страница рукописи оформляется следующим образом: в начале статьи указывается индекс Универсальной десятичной классификации (УДК); затем прописными буквами печатается название статьи, которое должно быть максимально кратким (информированным) и не содержать сокращений; далее следуют инициалы и фамилии авторов. Отдельной строкой дается название учреждения и города (для иностранных авторов – также страны). Ниже печатается электронный адрес для переписки. При наличии авторов из нескольких организаций необходимо арабскими цифрами указать их принадлежность. Через один полуторный интервал следует краткая аннотация (8–10 строк), в которой сжато и ясно описываются основные результаты работы. После аннотации через полуторный интервал приводятся ключевые слова и словосочетания (не более 6–8). Далее идут инициалы и фамилии авторов, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке. Английская аннотация объемом (до 2000 п.з. или 1 м.с.) для читателей, не владеющих русским языком, должна стать независимым источником информации (пересказом статьи). В тех случаях, когда текст статьи поделен на разделы, автор может подобным образом разделить и текст аннотации. Редколлегия проверяет качество английского текста и в одностороннем порядке вносит необходимые правки. Во избежание разночтений автор в отдельном файле представляет русский текст, по которому был произведен перевод расширенной аннотации.

Текст статьи состоит, как правило, из введения, основного текста, заключения (резюме) и списка литературы. В статье, описывающей результаты экспериментальных исследований, рекомендуется выделить разделы: «Материал и методы», «Результаты и обсуждение». Отдельно прилагаются подписуточные подписи (на русском и английском языках).

Во введении в максимально лаконичной форме должны быть изложены цель, существо и новизна рассматриваемой задачи с обязательным кратким анализом данных наиболее важных и близких по смыслу работ других авторов. Однако введение не должно быть обзором литературы. В разделе «Материал и методы» должны быть четко и кратко описаны методы и объекты исследования. Единицы измерения следует приводить в Международной системе единиц (СИ). Подробно описываются только оригинальные методы исследования, в других случаях указывают только суть метода и дают обязательно ссылку на источник заимствования, а в случае модификации – указывают, в чем конкретно она заключается.

При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в аннотации), необходимо давать их полное наименование, и сокращение в скобках, в последующем применяя только сокращение. Сокращение проводить по ключевым буквам слов в русском написании. Все используемые, включая общепринятые, аббревиатуры должны быть расшифрованы при первом упоминании. Все названия видов флоры и фауны при первом упоминании в тексте обязательно даются на латыни с указанием авторов.

В разделе «Результаты и обсуждение» полученные данные приводят либо в табличной форме, либо на рисунках, без дублирования одной формы другой, и краткого описания результатов с обсуждением в сопоставлении с данными литературы.

Таблицы должны быть составлены в соответствии с принятым стандартом, без включения в них легко вычисляемых величин. Все результаты измерений должны быть обработаны и оценены с применением методов вариационной статистики. Таблицы нумеруются по мере упоминания в статье, каждой дается тематический заголовок (на русском и английском языках) и размещаются на отдельной странице. Таблицы призваны иллюстрировать текстовый материал, поэтому описывать их содержание в тексте не следует. Ширина таблицы должна быть либо 90 мм (на одну колонку), либо 185 мм (на две колонки). Текст в таблице набирается шрифтом Times New Roman, кегль 9–10, через два интервала. Сокращение слов в шапке таблиц не допускается. Пустые графы в таблицах не допускаются. Они должны быть заменены условными знаками, которые объясняются в примечании. Единицы измерения даются через запятую, а не в скобках: масса, г. Если таблица в статье одна, то ее порядковый номер не ставится и слово «Таблица» не пишется.

Рисунки представляются пригодными для непосредственного воспроизведения, пояснения к ним выносятся в подписанные подписи (за исключением кратких цифровых или буквенных обозначений), отдельные фрагменты обозначаются арабскими цифрами или буквами русского алфавита, которые расписываются в подписанных подписях. На рисунках, выполненных на компьютере, линии должны быть яркими (4–5 рix).

Ширина рисунков должна быть либо 90 мм, либо 185 мм, а высота – не более 240 мм. Шрифт буквенных и цифровых обозначений на рисунках – Times New Roman, кегль 9–10. На рисунках следует использовать разные типы штриховок с размером шага, допускающим уменьшение, а не оттеночные заливки серого и черного цветов. Каждый рисунок должен быть выполнен на отдельной странице. На обратной стороне рисунка простым карандашом или ручкой указывается фамилия первого автора статьи и номер рисунка.

Карты должны быть выполнены на географической основе ГУГК (контурные или бланковые карты). Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания.

Математические символы, которые набираются прямым, а не курсивным шрифтом, типа log, lim, max, min, sin, tg, Ri, Im, числа Релея (Re), Россби (Ro), Кибеля (Ki) и другие, а также химические символы отмечаются снизу квадратной скобкой. Необходимо также дать расшифровку всех используемых в статье параметров, включая подстрочные и надстрочные индексы, а также всех аббревиатур (условные сокращения слов). Следует соблюдать единообразие терминов. Нумерация формул (только тех, на которые есть ссылка в тексте) дается в круглых скобках с правой стороны арабскими цифрами.

В тексте цитируемую литературу необходимо приводить только цифрами в квадратных скобках. Список литературы должен быть представлен на отдельной странице и составлен в порядке упоминания источников в тексте в соответствии с примером (см. ниже). Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

После Списка литературы размещается References – Пристатейный список литературы в транслите (на латинице) и в квадратных скобках перевод названия статьи и журнала на английский язык. References повторяет в полном объеме, с той же нумерацией Список литературы на русском языке, независимо от того, имеются ли в нем иностранные источники. Если в списке есть ссылки на иностранные публикации, они полностью повторяются как в Списке литературы, так и в References.

Список литературы и References оформляется по нижеприведенным примерам (следует обратить особое внимание на знаки препинания):

Список литературы:

1. Иванов И.И. Название статьи // Название журнала. 2005. Т. 41. №4. С. 18–26.
2. Петров П.П. Название книги. М.: Наука, 2007. (например, 180 с.) или конкретная страница (например, С. 75).
3. Казаков К.К. Название диссертации: Дис. канд. биол. наук. М.: Название института, 2002. 164 с.

References:

1. Иванов И.И. Название статьи (транслитерация) [Перевод названия статьи на англ.яз.] // Название журнала (транслитерация) [Перевод названия журнала на англ.яз]. Год. Том. Номер. Страницы.
2. Петров П.П. Название книги (транслитерация) [Перевод названия книги на англ.яз.]. Город: Издательство на англ.яз., год. Общее число страниц в книге (например, 180 с.) или конкретная страница (например, С. 75).
3. Казаков К.К. Название диссертации (транслит) [Перевод названия на англ.яз.]: Дис. канд. биол. наук. Город: Название института, год, страницы.

Например:

1. Ivanov I.I. Novye vidy vodjanyh kleshhei [New species of water mites] // Rossiiski zoologichskii jurnal [Russian J. of Zoology]. 2005. Vol.41. № 4. P. 18–26.

2. *Petrov P.P.* Elektrotechnichskie materialy [Electrotechnical materials]. Moscow: Nauka, 2007. Общее число страниц в книге (например, 180 р.) или конкретная страница (например, Р. 75.).
3. *Kazakov K.K.* Impedans elektrohimicheskoi yacheiki [Impedance of electrochemical cell]: Diss. ... Cand. Sci. (Biology). Moscow: Inst. of Political Reseach, 2002. 164 p.

При наличии большого количества авторов в списке литературы указываются все или четыре автора и др.

Для транслитерации списка литературы удобно использовать интернет-ресурс <http://translit-online.ru/>

При несоблюдении этих перечисленных правил статья не рассматривается редакционной коллегией, а возвращается авторам на доработку.

Все статьи проходят рецензирование и в случае необходимости возвращаются авторам на доработку. Рецензирование статьи закрытое. Возможно повторное и параллельное рецензирование. Редакционная коллегия оставляет за собой право редактирования статьи. Статьи публикуются в порядке очередности, но при этом учитывается их тематика и актуальность. Редакционная коллегия сохраняет первоначальную дату поступления статьи, а, следовательно, и очередность публикации, при условии возвращения ее в редакционную коллегия не позднее, чем через 1 месяц. Корректуру принятой в печать статьи редакционная коллегия иногородним авторам рассылает по e-mail. Автор в течение 5–7 дней должен вернуть ее в редакционную коллегия или передать правку по указанному телефону или электронному адресу (e-mail) редакционной коллегии. В случае отклонения материала рукописи, приложения и диски не возвращаются.

Требования к электронной версии статьи

При подготовке материалов для журнала с использованием компьютера рекомендуются следующие программы и форматы файлов.

Текстовые редакторы: Microsoft Word for Windows. Текст статьи набирается с соблюдением следующих правил:

- набирать текст без принудительных переносов;
- разрядки слов не допускаются;
- уравнения, схемы, таблицы, рисунки и ссылки на литературу нумеруются **в порядке их упоминания в тексте**; нумеровать следует лишь те формулы и уравнения, на которые даются ссылки в тексте;
- в числовых значениях десятичные разряды отделяются запятой;
- вставка символов **Symbol**.

Графические материалы: *Растровые рисунки* должны сохраняться только в формате TIFF с разрешением 300 dpi (точек на дюйм) для фотографий и не менее 600 dpi (точек на дюйм) для остальных рисунков (черно-белый). Использование других форматов нежелательно.

Векторные рисунки (не диаграммы) должны предоставляться в формате программы, в которой они созданы: CorelDraw, Adobe Illustrator. Если использованная программа не является распространенной, необходимо сохранить файлы рисунков в формате Enhanced Windows Metafile (EMF) или Windows Metafile (WMF).

Диаграммы: Рекомендуется использовать Microsoft Excel, Origin для Windows (до версии 6.0).

Не рекомендуется пользоваться при работе программой Microsoft Graph и программами Paint из Windows 95, Microsoft Draw.

Рукописи статей **только простым письмом** направлять по адресу:

Ответственному секретарю редакционной коллегии

журнала «Известия Коми НЦ УрО РАН»

Андрею Яковлевичу Полле

167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24,

ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, каб. 209

Тел. (8212) 24-47-79, факс (8212) 24-17-46

E-mail: journal@frc.komisc.ru.

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ

Коми научного центра
Уральского отделения РАН

Вып. 3(35)

Выпуск подготовили:

Научный редактор д.б.н. М.В.Гецен
Помощник главного редактора к.и.н. А.В.Самарин
Редактор Т.В.Цветкова
Компьютерное макетирование Н.А.Сулейманова
Корректura английского перевода Т.А. Искакова

Лицензия № 0047 от 10.01.1999.
Компьютерный набор. Подписано в печать 21.09.2018.
Формат бумаги 60x84¹/₈. Печать офсетная.
Усл.-печ.л. 15,75. Уч.-изд.л. 15,5. Тираж 300. Заказ № 26.
Свободная цена.

Подготовлено к изданию и отпечатано:
Редакционно-издательский отдел
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.
167982, ГСП, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 48.

Адрес учредителя, издателя: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр УрО РАН».
167982, ГСП-2, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 24.