

DOI: 10.21209/2308-8761  
DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4

ISSN 2308-8761  
ISSN 2542-0070 (Online)

**2017. Том 12, № 4**

**2017. Vol. 12, No. 4**

# Учёные записки

Забайкальского государственного университета

**Серия «Физика, математика, техника, технология»**

## Scholarly Notes

Of Transbaikal State University

**Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology**

### УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Забайкальский государственный  
университет»

672039, Россия, Забайкальский край,  
г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30

### АДРЕС РЕДАКЦИИ

672007, Россия, Забайкальский край,  
г. Чита, ул. Бабушкина, 129  
Тел.: 8 (3022) 35-24-79  
Факс: 8 (3022) 41-64-44

### FOUNDER AND PUBLISHER

Federal State Budgetary  
Educational Institution  
of Higher Education  
"Transbaikal State  
University"

30 Aleksandro-Zavodskaya st.,  
Transbaikal Territory, 672039, Russia

### EDITORIAL OFFICE ADDRESS

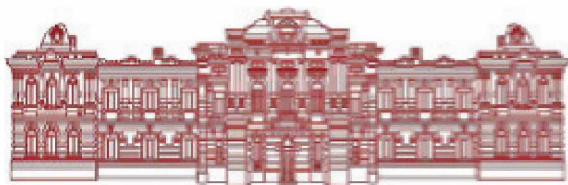
129 Babushkina st., Chita,  
Transbaikal Territory, 672007, Russia  
Tel. number: 8 (3022) 35-24-79  
Fax: 8 (3022) 41-64-44

**E-mail: [zab-nauka@mail.ru](mailto:zab-nauka@mail.ru)**

**<http://www.uchzap.com>**

# Учёные записки

Забайкальского  
государственного  
университета



*Серия*  
«Физика, математика, техника,  
технология»

**Научный журнал**  
Основан в 1957 г.  
Выходит шесть раз в год

**Журнал зарегистрирован**  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

**Свидетельство о регистрации**  
ПИ № ФС77-54257 от 24.05.2013

**Журнал входит**  
в Перечень ведущих рецензируемых научных  
журналов и изданий, в которых должны быть  
опубликованы основные научные результаты  
диссертаций на соискание учёных степеней  
доктора и кандидата наук: *социологические,*  
*педагогические, биологические науки*

**Редакция** журнала руководствуется положением  
Гражданского кодекса РФ по авторскому праву,  
международными стандартами редакционной  
этики, лицензией Creative Commons «Attribution»  
(«Атрибуция») 4.0 Всемирная



**Подписной индекс** журнала  
в «Пресса России» **42408**

**Размещение и индексация журнала:**  
Научная электронная библиотека (РИНЦ),  
CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory,  
Open Academic Journals Index,  
IPRbooks, ИВИС, Citefactor, ВИНТИ РАН,  
Университетская библиотека онлайн,  
КиберЛенинка

Журнал представляет собой сборник оригинальных и обзорных научных статей, посвящённых аналитическому решению задач математической физики в областях, содержащих плёночные включения и плёночные покрытия, задач оптимизации, математической теории игр; работы по экспериментальной физике: исследованию ледяных покровов, проблемам добычи полезных ископаемых, а также работы по различным инженерным технологиям.

Материалы журнала будут интересны широкой научной общественности, преподавателям вузов, аспирантам, студентам, деятелям культуры и образования.

# Scholarly Notes of Transbaikal State University

*Series*

Physics, Mathematics, Engineering, Technology

## *Uchenye Zapiski* *Zabaikal'skogo*

*Gosudarstvennogo Universiteta*  
*Seriya*

*Fizika, Matematika, Tekhnika,*  
*Tekhnologiya*

**Scientific Journal**  
Founded in 1957  
Published six times per year

**The journal is registered**  
by the Federal Supervision Service in the Field  
of Communications, Information Technology  
and Mass Communications (Roskomnadzor)

**Registration certificate**  
ПИ № ФС77-54257 от 24.05.2013

**The journal**  
is in the List of the leading refereed  
scientific journals  
and editions which publish the main results  
of dissertations for academic degrees  
of doctors and candidates of sciences: *sociological,*  
*pedagogical, biological sciences*

**The editorial board** is guided by the provisions  
of the Civil Code of the Russian Federation  
on Copyright, international editorial  
ethics standards, Creative Commons license  
“Attribution” (“Attribution”) 4.0 Universal



**Subscription index** of the journal  
in “Press of Russia” **42408**

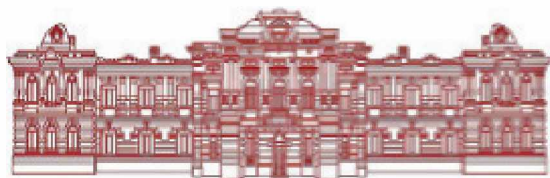
**Journal indexing:**  
Russian Science Citation Index (RSCI),  
CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory,  
Open Academic Journals Index,  
IPRbooks, IVIS, Citefactor, VINITI RAS,  
University library online,  
CyberLeninka

The journal is a collection of original and review scientific papers on analytical solution of mathematical physics problems in the fields containing film inclusions and film coatings, optimization problems, mathematical theory of games, works on experimental physics: the study of ice sheets, problems of mining, as well as works on various engineering technologies.

Materials will be interesting to the wide scientific community, university professors, postgraduate students, students, workers in culture and education.

# Учёные записки

Забайкальского  
государственного  
университета



*Серия*  
«Физика, математика, техника,  
технология»

## Редакционная коллегия

### Выпускающий редактор

**С. Е. Холодовский**, доктор физико-математических наук, профессор (Чита, Россия);

**С. Ф. Забелин**, доктор технических наук, профессор (Чита, Россия)

### Члены редколлегии

**П. Б. Авдеев**, доктор технических наук, профессор (Чита, Россия);

**В. Е. Архинчеев**, доктор физико-математических наук, профессор (Улан-Удэ, Россия);

**В. В. Мазалов**, доктор физико-математических наук, профессор, (Петрозаводск, Россия);

**Ю. М. Овешников**, доктор технических наук, профессор (Чита, Россия);

**М. И. Эпов**, доктор технических наук, профессор, академик РАН, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск, Россия)

### Главный редактор

**И. В. Ерофеева**, доктор филологических наук, доцент

### Ответственный секретарь

**Е. В. Седина**, кандидат культурологии

◆

Редактор В. К. Демиденко,  
редактор перевода В. М. Ерёмина,  
вёрстка Г. А. Зенковой,  
дизайн обложки М. Р. Коптеловой

Подписано в печать 10.09.2017.

Дата выхода в свет 15.09.2017.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.

Гарнитура «Times».

Способ печати оперативный.

Усл. печ. л. 12,0 Уч.-изд. л. 7,1. Заказ № 17153.

Тираж 1000 экз. (1-й з-д 1–100 экз.).

Цена свободная

Отпечатано в ФГБОУ ВО «Забайкальский  
государственный университет»  
672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30

© Забайкальский государственный  
университет, 2017

# Scholarly Notes of Transbaikal State University

*Series*

Physics, Mathematics, Engineering, Technology

## *Uchenye Zapiski* *Zabaikal'skogo*

*Gosudarstvennogo Universiteta*  
*Seriya*

*Fizika, Matematika, Tekhnika,*  
*Tekhnologiya*

## *Editorial Board*

### Main Handling Editor

**S. E. Kholodovskii**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Chita, Russia);

**S. F. Zabelin**, Doctor of Engineering Science, Professor (Chita, Russia)

### Editorial board members

**P. B. Avdeev**, Doctor of Engineering Science, Professor (Chita, Russia);

**V. E. Arkhincheev**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Ulan-Ude, Russia);

**V. V. Mazalov**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Petrozavodsk, Russia);

**Y. M. Oveshnikov**, Doctor of Engineering Science, Professor (Chita, Russia);

**M. I. Epov**, Doctor of Engineering Science, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)

### Editor-in-chief

**I. V. Erofeeva**, Doctor of Philology, Associate Professor

### Executive Secretary

**E. V. Sedina**, Candidate of Culturology

◆

Corrector V. K. Demidenko,  
Editor of the English Translation V. N. Eremina,  
Make-up G. A. Zenkova,  
Cover design M. R. Koptelova

Signed to print 10.09.2017.

Date of publication 15.09.2017.

Format 60 × 84 1/8. Offset paper. Headset "Times".

Operative printing.

Conv. quires 12,0. Ed.-print quires 7,1. Order № 17153.

Circulation 1000 copies. (first impression 1–100 copies).

Free price

Printed by FSBEI HE "Transbaikal  
State University"  
672039, Russia, Chita, 30 Aleksandro-Zavodskaya st.

© Transbaikal State University, 2017



## СОДЕРЖАНИЕ

### Задачи математической физики. Аналитические методы

<i>Ефимова И. А.</i> О движении полуограниченной струны с упругим контактом (точечной массой) на конце.....	6
<i>Забелин А. А.</i> Численное решение задачи минимизации финансовых затрат на освещение рабочих мест.....	11
<i>Толпаев В. А., Кравцов А. М., Петросянц М. Т., Бондаренко М. А.</i> Одна задача аппроксимации комплексов технологических данных методами нечёткой логики.....	15
<i>Холодовский С. Е.</i> О решении краевых задач для неоднородных дифференциальных уравнений в полуцилиндрах, ограниченных двухслойной плёнкой.....	24

### Техника. Технология. Эксперимент

<i>Акселевич В. И., Мазуров Г. И., Хайруллин К. Ш.</i> Гидрометеорологические опасности Арктики и методика их мониторинга.....	29
<i>Березин С. Я.</i> Параметрический анализ структуры мехатронного привода завинчивающих автоматов.....	38
<i>Костромин М. В.</i> Новые тенденции в области интенсификации массообмена при кучном выщелачивании золота.....	45
<i>Крылов С. Д.</i> Использование микроволнового излучения для исследования тонких плёнок жидкости на поверхности металла.....	52
<i>Панина Т. Ю., Костромин М. В.</i> Геокриологические проблемы и их решения при разработке россыпных месторождений.....	59
<i>Пирогов Г. Г.</i> Принципы вскрытия рудных месторождений при разработке на базе подземных горно-обогатительных комплексов.....	73
<i>Степанов Н. П., Титова Г. М., Лозовская А. С., Степанова Л. Э.</i> Спектрофотометрическое исследование экстрактов растений <i>Allium lineare L</i> и <i>Allium nutans L</i> в инфракрасной и видимой областях спектра.....	80
<i>Цыренжапов С. В., Бордонский Г. С., Сигачёв Н. П.</i> Использование микроволновых, электрических и тепловых измерений для изучения фазового состояния воды в нанопористых средах.....	88

### Научная жизнь

Вселенная таланта профессора Святослава Евгеньевича Холодовского (к 70-летию юбилею).....	97
---	----

# CONTENTS

## Problems of Mathematical Physics. Analytical Methods

<i>Efimova I. A.</i> On the Motion of Semi Bounded String with Elastic Contact (Mass Point) at the End .....	6
<i>Zabelin A. A.</i> Numerical Solution of the Problem of Minimizing Financial Costs for Lighting Workplaces .....	11
<i>Tolpayev V. A., Kravtsov A. M., Petrosyants M. T., Bondarenko M. A.</i> One Problem of the Approximation of Process Data Set by Methods of Fuzzy Logic.....	15
<i>Kholodovskii S. Ye.</i> Regarding the Solution of Boundary Value Problems for Nonhomogeneous Differential Equations in Half-Cylinders Bounded Two-Layer Film.....	24

## Engineering. Technology. Experiment

<i>Akselevich V. I., Mazurov G.I., Khairullin K. Sh.,</i> Hydrometeorological Hazards of the Arctic and Methodology for their Monitoring .....	29
<i>Berezin S. Ya.</i> Parametrical Analysis of Mechatronics Drive Structure of the Screwing Automatic Devices .....	38
<i>Kostromin M. V.</i> New Trends in the Intensification of Mass Transfer in Heap Leaching of Gold.....	45
<i>Krylov S. D.</i> Using Microwave Radiation to Study Thin Liquid Films on a Metal Surface .....	52
<i>Panina T. Yu., Kostromin M. V.</i> Geocryological Problems and Their Solutions in the Development of Placer Deposits.....	59
<i>Pirogov G. G.</i> The Principles of Opening Ore Deposits in the Development on the Basis of Underground Mining Complexes .....	73
<i>Stepanov N. P., Titova G. M., Lozovskaya A. S., Stepanova L. E.</i> Spectrophotometric Examination of Extracts Plants <i>Allium lineare L</i> and <i>Allium nutans L</i> in the Infrared and Visible Areas of the Spectrum .....	80
<i>Tsyrenzhapov S. V., Bordonskiy G. S., Sigachev N. P.</i> Using Microwave, Electric and Thermal Measurements for Study of the Phase State of Water in Nano-Porous Media.....	88

## Scientific Life

The Universe of Talent of Professor Svyatoslav Evgenevich Kholodovskii (to the 70th Birthday Anniversary) .....	97
---	----

**ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ  
МЕТОДЫ**

**PROBLEMS OF MATHEMATICAL PHYSICS. ANALYTICAL METHODS**

УДК 517.958

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-6-10

*Ирина Анатольевна Ефимова,*  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
Забайкальский институт предпринимательства  
(672086, Россия, г. Чита, ул. Ленинградская, 16),  
e-mail: yefimova79@yandex.ru

**О движении полуограниченной струны с упругим контактом  
(точечной массой) на конце**

Рассмотрены две краевые задачи для полуограниченной струны с неоднородными граничными условиями типа упругого контакта и точечной массы, что моделирует неидеальные контакты протяжённых объектов с внешней средой. Уравнение и начальные условия однородны. Решения рассмотренных задач получены в явном виде. Приведены конкретные примеры, для которых решения задач получены в конечном виде.

**Ключевые слова:** краевые задачи, движение полуограниченной струны, упругие контакты, точечные массы

В реальных условиях не существует абсолютно покоящихся объектов. Все «неподвижные» объекты под воздействием внешних факторов в той или иной мере совершают малые колебания. В технике часто концы колеблющихся предметов предохраняют от разрушения амортизирующими прокладками типа упругих контактов. Также границы колеблющихся предметов утяжеляют, что препятствует их движению. Отсюда имеет большой практический интерес решение задач о колебании протяжённых объектов с упругим контактом и с точечной массой на конце.

**1. Движение струны с упругим контактом.** Рассмотрим задачу о движении полуограниченной струны (или стержня) без начального возмущения и без начальной скорости с упругим контактом типа пружинки на конце струны

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad 0 < t < \infty, \quad (1)$$

$$u|_{t=0} = 0, \quad u_t|_{t=0} = 0, \quad x \geq 0, \quad (2)$$

$$u + B u_x|_{x=0} = f(t), \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $B > 0$  – постоянная, буквенные индексы означают частные производные. В данном случае к концу струны  $x = 0$  прикреплена пружинка, свободный (левый) конец которой движется по заданному закону  $f(t)$ . Отсюда на конце струны проекция силы натяжения на ось  $u$  (т. е.  $Tu_x$ ) пропорциональна растяжению пружинки:  $Tu_x = k[f(t) - u]$  при  $x = 0$ , где  $T$  – модуль силы натяжения,  $k$  – жёсткость пружинки,  $B = T/k$  (3). Отметим, что в статье [1] рассмотрена аналогичная задача, когда левый конец пружинки не движется.

Из первого условия (2) следует

$$u(0, 0) = 0. \quad (4)$$

Поскольку в задаче (1)–(3) источник движения находится на левом конце струны, то решение этой задачи будем искать в виде прямой волны (т. к. для обратной волны нет источника движения справа от точки  $x = 0$ )

$$u(x, t) = P(x - at), \quad (5)$$

где  $a > 0$ . Отсюда функция  $u(x, t)$  для любой дважды кусочно-дифференцируемой функции  $P(z)$  удовлетворяет уравнению (1) (на соответствующих отрезках). Из начальных условий (2) находим

$$P(x) \equiv 0, \quad x > 0. \quad (6)$$

Граничное условие (3) для функции (5) примет вид обыкновенного дифференциального уравнения  $P(-at) + BP'(-at) = f(t)$  или

$$P(z) + BP'(z) = f(-z/a), \quad z = -at < 0$$

при начальном условии  $P(0) = 0$ , которое следует из условия (4). Отсюда функцию  $P(z)$  при  $z < 0$  найдём в виде

$$P(z) = \beta e^{-\beta z} \int_0^z e^{\beta y} f(-y/a) dy, \quad z < 0,$$

где  $\beta = 1/B$ . Тогда с учётом (5), (6) решение исходной задачи (1)–(3) получим в виде

$$u(x, t) = \begin{cases} \beta e^{-\beta(x-at)} \int_0^{x-at} e^{\beta y} f(-y/a) dy, & 0 < x < at, \\ 0 & x \geq at. \end{cases} \quad (7)$$

Отметим, что полученное решение непрерывно при  $0 < x < \infty$ , включая «бегущую» точку  $x = at$  (в точке  $x = at$  производная  $u_x$  имеет разрыв). Справа от «бегущей» точки (при  $x \geq at$ ) струна находится в покое, т. к. до этой точки волна, индуцированная на левом конце струны, еще не дошла для момента времени  $t$ .

Рассмотрим конкретные примеры. Пусть левый конец пружинки движется по периодическому закону  $f(t) = \sin pt$ . Тогда решение (7) задачи (1)–(3) найдём в конечном виде в

элементарных функциях

$$u(x, t) = \begin{cases} \frac{q[\cos p(t-x/a) + q \sin p(t-x/a) - e^{\beta(at-x)}]}{1+q^2}, & 0 < x < at, \\ 0, & x \geq at, \end{cases}$$

где  $q = a/(pB)$ ,  $\beta = 1/B$ .

Аналогично решается задача для начальной функции  $f(t) = \cos pt$ , при этом решение задачи (1)–(3) имеет вид

$$u(x, t) = \begin{cases} \frac{q[q \cos p(t-x/a) - qe^{\beta(at-x)} - \sin p(t-x/a)]}{1+q^2}, & 0 < x < at, \\ 0, & x \geq at. \end{cases}$$

Последнее позволяет находить решения задач в конечном виде для широкого класса функций  $f(t)$  вида частичных сумм рядов Фурье.

**2. Движение струны с точечной массой.** Рассмотрим задачу о движении полуграниченной струны (стержня) с точечной массой на конце  $x = 0$

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad 0 < t < \infty, \quad (8)$$

$$u|_{t=0} = 0, \quad u_t|_{t=0} = 0, \quad x \geq 0, \quad (9)$$

$$u_x + Au_{xx}|_{x=0} = f(t), \quad (10)$$

где постоянная  $A > 0$ . В данном случае на конце струны  $x = 0$  находится точечная масса  $m$ , на которую действует сила с заданным законом изменения проекции этой силы на ось  $u$  вида  $\varphi(t)$ . При этом на конце струны сила инерции  $mu_{tt}$  пропорциональна приращению проекции сил натяжения на ось  $u$ :  $mu_{tt} = \varphi(t) - Tu_x$  при  $x = 0$  [2, с. 147]. Отсюда с учётом уравнения (8) ( $u_{tt} = a^2 u_{xx}$ ) следует граничное условие (10), где  $A = ma^2/T$ ,  $f(t) = \varphi(t)/T$ .

Из первого условия (9) вида  $u(x, 0) \equiv 0$  следует

$$u(0, 0) = 0, \quad u_x(0, 0) = 0, \quad (11)$$

где  $x = +0$ .

Как и выше, представим решение задачи (8)–(10) в виде прямой волны (5), т. е. функция  $u(x, t)$  (5) удовлетворяет уравнению (8). Из начальных условий (9) находим

$$P(x) \equiv 0, \quad x > 0. \quad (12)$$

Граничное условие (10) для функции (5) примет вид обыкновенного дифференциального уравнения

$$P'(z) + AP''(z) = f(-z/a), \quad z = -at < 0$$



при начальных условиях  $P(0) = 0$ ,  $P'(0) = 0$ , которые следуют из условий (11). Отсюда функцию  $P(z)$  при  $z < 0$  найдём в виде

$$P(z) = \int_0^z f(-y/a)dy - e^{-\gamma z} \int_0^z e^{\gamma y} f(-y/a)dy, \quad z < 0,$$

где  $\gamma = 1/A$ . Тогда с учётом (5), (12) решение задачи (8)–(10) получим в виде

$$u(x, t) = \begin{cases} \int_0^{x-at} f(-y/a)dy - e^{\gamma(at-x)} \int_0^{x-at} e^{\gamma y} f(-y/a)dy, & 0 < x < at, \\ 0 & x \geq at. \end{cases} \quad (13)$$

При этом функция (13) непрерывна при  $0 < x < \infty$ .

В качестве примера рассмотрим функцию  $f(t) = \sin pt$ . Тогда решение (13) задачи (8)–(10) найдём в конечном виде

$$u(x, t) = \begin{cases} \frac{a[q^2 \cos p(t-x/a) - q \sin p(t-x/a) + e^{\gamma(at-x)}]}{p(1+q^2)}, & 0 < x < at, \\ 0 & x \geq at, \end{cases}$$

где  $q = a/(pA)$ ,  $\gamma = 1/A$ .

В случае  $f(t) = \cos pt$  решение задачи (8)–(10) имеет вид

$$u(x, t) = \begin{cases} \frac{a[q e^{\gamma(at-x)} - q \cos p(t-x/a) - q^2 \sin p(t-x/a)]}{p(1+q^2)}, & 0 < x < at, \\ 0 & x \geq at. \end{cases}$$

Для линейной комбинации рассмотренных в данных примерах функций  $f(t)$  с различными значениями  $p$  решение задачи (8)–(10) также строится в конечном виде.

### Список литературы

1. Холодовский С. Е., Потехо А. О. Решение краевой задачи о движении полуограниченной струны с граничным условием третьего рода // Ученые записки ЗабГУ. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2013. № 3. С. 140–145.
2. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 735 с.

*Статья поступила в редакцию 19.05.2017; принята к публикации 01.06.2017*

### Библиографическое описание статьи

Ефимова И. А. О движении полуограниченной струны с упругим контактом (точечной массой) на конце // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 6–10. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-6-10.

*Irina A. Efimova,*  
*Candidate of Engineering Science, Associate Professor,*  
*Transbaikal Institute of Entrepreneurship*  
*(16 Leningradskaya st., Chita, Russia, 672086),*  
*e-mail: yefimova79@yandex.ru*

**On the Motion of Semi Bounded String with Elastic Contact (Mass Point)  
at the End**

We consider two boundary value problems for semi bounded string with non-uniform boundary conditions of type elastic contact and a point mass, which simulates non-ideal contacts of extended objects with the external environment. The equation and the initial conditions are homogeneous. Solving the considered task is given explicitly. Specific examples for which the solution of tasks is received in final form are given.

**Keywords:** boundary value problems, movement of semi bounded string, elastic contacts, the mass point

**References**

1. Kholodovskii S. E., Potekho A. O. Reshenie kraevoi zadachi o dvizhenii poluogranichennoi struny s granichnym uslovиеm tret'ego roda // Uchenye zapiski ZabGU. Ser. Fizika, matematika, tekhnika, tekhnologiya. 2013. № 3. S. 140–145.
2. Tikhonov A. N., Samarskii A. A. Uravneniya matematicheskoi fiziki. M.: Nauka, 1972. 735 s.

*Received: May 19, 2017; accepted for publication June 01, 2017*

**Reference to article**

*Efimova I. A.* On the Motion of Semi Bounded String with Elastic Contact (Mass Point) at the End // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. No. 4. PP. 6–10. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-6-10.

УДК 519.863

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-11-14

*Анатолий Анатольевич Забелин,*  
*кандидат физико-математических наук, доцент,*  
*Читинский институт Байкальского государственного университета*  
*(672000, Россия, г. Чита, ул. Анохина, 56),*  
*e-mail: anatanza@mail.ru*

### Численное решение задачи минимизации финансовых затрат на освещение рабочих мест

В статье исследуется задача выбора момента начала рабочего дня, единого для всего календарного года, для минимизации суммарного годового времени пересечения тёмного времени суток и рабочего времени. Решение заключается в построении оптимизационной нелинейной модели и нахождении приближённого результата численными методами.

**Ключевые слова:** рабочее время, оптимизация, численная оптимизация

**Постановка задачи.** Известно, что продолжительность светового дня в течение года меняется: в зимний период она минимальна, в летний максимальна. Рабочее время, напротив, не меняется в течение года: его длительность определяется нормативными документами. Естественным образом возникает ситуация, когда часть рабочего времени приходится на тёмное время суток, а именно, на время до восхода солнца и после его заката. Работа в тёмное время суток требует электрического освещения рабочих мест, что приводит к финансовым расходам. Отсюда вытекает задача минимизации затрат на освещение. Не имея возможности регулировать продолжительность рабочего времени, мы можем регулировать момент начала рабочего дня. Заметим, что этот момент должен быть установлен фиксированно и не может меняться в течение года. Это следует из соображений разумности (нелогично устанавливать в течение года разное начало рабочего дня) и текущего федерального законодательства, согласно которому на протяжении календарного года не происходит перехода на летнее время и обратно [1].

Полагая финансовые затраты пропорциональными времени, можно задачу переформулировать: определить единый для всего года момент начала рабочего дня так, чтобы суммарное годовое время пересечения тёмного времени суток и рабочего времени было минимально.

Заметим, что ранее, когда применялась практика летнего и зимнего времени, в данной постановке задачу было сформулировать невозможно.

**Решение.** Введём некоторые параметры. Пусть  $i \in \overline{1, 365}$  — номер дня в году (решим задачу для невисокосного года),  $x_i$  — момент восхода солнца в  $i$ -й день,  $y_i$  — момент заката солнца в  $i$ -й день,  $b$  — момент начала рабочего дня,  $d$  — продолжительность рабочего дня. Необходимо определить минимум функции «дефекта», вычисляющей суммарную длительность рабочего времени, приходящегося на тёмное время суток, а именно

$$\min_b \sum_{i=1}^{365} (\max\{x_i - b; 0\} + \max\{b + d - y_i; 0\}).$$

Величины  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $b$ ,  $d$  могут измеряться в часах, а могут быть нормированы и располагаться в пределах от 0 до 1 (как, например, это сделано в вычислительных системах, в

которых дням соответствуют целые числа, а моментам времени в течение дня — дробные числа из промежутка от 0 до 1). Величины  $x_i$  и  $y_i$  различны для разных регионов РФ. В качестве естественного примера была выбрана статистика восхода и заката солнца в 2016 году в Забайкальском крае [2].

Так как решение надо указать с точностью до минуты, можно использовать не только нелинейные оптимизационные алгоритмы, но и шаговый переборный метод поиска оптимального решения (указать диапазон значений параметра  $b$ , с шагом в одну минуту вычислить значения функции «дефекта» и выбрать из них минимальный).

Используя последний метод, положив, что  $d = 9$  часов (восьмичасовой рабочий день с часовым перерывом на обед) или  $d = 0.375$  в случае нормирования, и указав диапазон значений параметра  $b$  от 6 часов утра до 12 часов дня, или от точки 0.25 до 0.5 в случае нормирования, было получено, что минимум функции «дефекта» достигается, когда начало рабочего дня приходится на 08:54 утра.

Листинг программы (диалект PascalABC):

```

program optimaltime;
var t: text;
    s: string;
    a: array[1..366,1..2] of real;
    b: array[1..360,1..2] of real;
    c,min: real;
    n: integer;
begin
assign(t,'time.csv');
reset(t);
for var i:=1 to 366 do
begin
readln(t,s);
a[i,1]:=strtofloat(copy(s,1,7));
a[i,2]:=strtofloat(copy(s,9,7));
end;
close(t);
for var j:=1 to 360 do
begin
b[j,1]:=(359+j)/1440;
b[j,2]:=0;
for var i:=1 to 366 do
b[j,2]:=b[j,2]+max(a[i,1]-b[j,1],0)+max(b[j,1]+0.375-a[i,2],0);
end;
min:=b[1,2];
n:=1;
for var j:=1 to 360 do
if b[j,2]<min then
begin
n:=j;
min:=b[j,2];
end;
writeln('Оптимальный момент начала рабочего дня: ');
writeln((359+n) div 60,' ч ',(359+n) mod 60,' мин');
end.

```

Допуская, что по соображениям удобства начало рабочего дня лучше ассоциировать с началом целого часа, можно сказать, что оптимально начинать рабочий день в 09:00 утра, а заканчивать в 18:00 вечера. При этом суммарное время, попадающее на тёмное время суток, будет составлять 2.93 суток. Заметим, что если началом рабочего дня положить момент 08:00 утра, то суммарное время, попадающее на тёмное время суток, будет уже составлять 5.56 суток. Пользуясь вычисленным значением «дефекта», можно вычислять примерную оценку экономической эффективности оптимального решения по сравнению с каким-либо неоптимальным случаем. Также, взяв данные по иному региону РФ, можно получить решение, соответствующее избранной географической точке.

### Список литературы

1. Федеральный закон от 30 декабря 2015 года № 453-ФЗ «О внесении изменений в статью 5 Федерального закона "Об исчислении времени"». Принят Государственной Думой 22 декабря 2015 года, одобрен Советом Федерации 25 декабря 2015 года, подписан Президентом Российской Федерации В. Путиным 30 декабря 2015 года.
2. Мировое время: [dateandtime.info](http://www.dateandtime.info) [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL://<http://www.dateandtime.info/ru/citysunrisesunset.php?id=2025339&month=12&year=2016> (дата обращения: 30.01.2017).

*Статья поступила в редакцию 09.05.2017; принята к публикации 01.06.2017*

### Библиографическое описание статьи

Забелин А. А. Численное решение задачи минимизации финансовых затрат на освещение рабочих мест // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 11–14. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-11-14.

*Anatoly A. Zabelin,*

*Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor,*

*Chita Institute of Baikal State University*

*(56 Anokhina st., Chita, 672000, Russia),*

*e-mail: anatanza@mail.ru*

### Numerical Solution of the Problem of Minimizing Financial Costs for Lighting Workplaces

The article describes the task of selecting the moment of the beginning of the working day, unified for the whole calendar year, in order to minimize the total annual time of intersection the dark time of the day and working time. The solution consists of constructing an optimization nonlinear model and finding the approximate result by numerical methods.

**Keywords:** working time, optimization, numerical optimization

### References

1. Federal'nyi zakon ot 30 dekabrya 2015 goda № 453-FZ "O vnesenii izmenenii v stat'yu 5 Federal'nogo zakona 'Ob ischislenii vremeni'". Prinyat Gosudarstvennoi Dumoi 22 dekabrya 2015 goda, odobren Sovetom Federatsii 25 dekabrya 2015 goda, podpisan Prezidentom Rossiiskoi Federatsii V. Putinyam 30 dekabrya 2015 goda.
2. Mirovye vremya: [dateandtime.info](http://www.dateandtime.info) [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: URL://<http://www.dateandtime.info/ru/citysunrisesunset.php?id=2025339&month=12&year=2016> (data obrashcheniya: 30.01.2017).

*Received: May 09, 2017; accepted for publication June 01, 2017*

**Reference to article**

*Zabelin A. A.* Numerical Solution of the Problem of Minimizing Financial Costs for Lighting Workplaces // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. No. 4. PP. 11–14. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-11-14.



УДК 519.65

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-15-23

*Владимир Александрович Толпаев,*  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Северо-Кавказский научно-исследовательский  
проектный институт природных газов  
(355035, Россия, г. Ставрополь, ул. Ленина, 419),  
e-mail: TolpaevVA@scnipigaz.ru

*Александр Михайлович Кравцов,*  
кандидат физико-математических наук,  
Северо-Кавказский научно-исследовательский  
проектный институт природных газов  
(355035, Россия, г. Ставрополь, ул. Ленина, 419),  
e-mail: alex\_k@bk.ru

*Мушег Тигранович Петросянц,*  
младший научный сотрудник  
лаборатории подземной гидродинамики, аспирант,  
Северо-Кавказский научно-исследовательский  
проектный институт природных газов  
(355035, Россия, г. Ставрополь, ул. Ленина, 419),  
e-mail: musheg901@mail.ru

*Мария Александровна Бондаренко,*  
младший научный сотрудник, аспирант,  
лаборатория подземной гидродинамики,  
Северо-Кавказский научно-исследовательский  
проектный институт природных газов  
(355035, Россия, г. Ставрополь, ул. Ленина, 419),  
e-mail: TolpaevVA@scnipigaz.ru

### **Одна задача аппроксимации комплексов технологических данных методами нечёткой логики**

Рассматривается задача аппроксимации табличных данных с большими одинаковыми размерами строк. Предложена формулировка задачи в терминах нечётких множеств и приближённый способ описания  $\alpha$  – срезов нечётких множеств специальными полиномиальными агрегатами – обобщениями полиномов Бернштейна для случая многих переменных. Построен приближённый алгоритм решения задачи, допускающий декомпозицию исходной задачи, приведён пример его работы. Представлены оценки для ряда характеристик аппроксимационной функции таблицы данных. Приводятся эмпирические оценки временной сложности алгоритма для ряда практических приложений алгоритма.

**Ключевые слова:** задача аппроксимации табличных данных, обнаружение зависимостей в данных, симплекс-метод, декомпозиция задачи аппроксимации

Математические описания современных технологических процессов содержат сотни и тысячи числовых или шкалированных переменных. Зачастую данные между собой связаны

многочисленными зависимостями и образуют комплексы данных. Построение математических моделей для такого рода описаний и манипулирование данными возможно лишь с применением современных высокопроизводительных компьютерных средств.

Компьютерная обработка предполагает представление данных в удобном для автоматической обработки виде — формальной записи. В работе предлагается использовать способ формальной записи знаний о состоянии технологической системы, предоставляемый аппаратом теории нечёткой логики [3]. В основе алгебрологического описания знаний средствами нечёткой логики лежит описание множеств (нечётких) посредством задания для них функций принадлежности  $\chi_A(x)$  со значениями из интервала  $[0, 1]$ , или иначе нечёткой меры. Для детерминированных множеств мера принадлежности элемента  $x$  определяется проще

$$\chi_A = \begin{cases} 1, & x \in A, \\ 0, & x \notin A. \end{cases}$$

Функция принадлежности, за исключением ряда простейших случаев [3], не может быть задана явно, аналитически. На практике, как правило, множества состояний системы полностью не очерчены, поэтому пользуются описаниями  $\alpha$ -срезов нечётких множеств  $F \subseteq X$ , обозначаемых  $A_\alpha$

$$A_\alpha(x) = \{x \in X \mid \chi_A(x) \geq \alpha\}.$$

Будем считать, что множество экспериментальных данных  $A$  может быть представлено семейством своих  $\alpha$ -срезов  $A_\alpha(x)$ . Экспериментальные данные, после подходящей нормировки, принадлежат некоторому конусу  $\Omega$ . Для аппроксимации  $\alpha$ -срезов воспользуемся обобщением полиномов Бернштейна (ОПБ) на многомерный случай [2]. Обобщением полинома Бернштейна функции  $f(x)$  заданной в конусе  $\Omega \in R^n$ ,

$$\Omega = \left\{ \mathbf{x} \mid \mathbf{x} = \lambda_1(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{X}_1 + \lambda_2(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{X}_2 + \dots + \lambda_M(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{X}_M, \lambda_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^M \lambda_i = 1, \mathbf{X}_j \in R^n \right\},$$

степени  $N$  будем называть полином

$$P_N(\mathbf{x}) = \sum_{|\mathbf{k}|=N} f(\mathbf{x}_{\mathbf{k}}) \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M}. \quad (1)$$

Здесь суммирование выполняется по всем значениям мультииндекса  $\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_M)$  высотой  $N$ ,  $|\mathbf{k}| = k_1 + k_2 + \dots + k_M = N$ , узлы ОПБ  $\mathbf{x}_{\mathbf{k}} = \frac{k_1}{N} \cdot \mathbf{X}_1 + \frac{k_2}{N} \cdot \mathbf{X}_2 + \dots + \frac{k_M}{N} \cdot \mathbf{X}_M$ , мультиномиальный коэффициент  $(N; k_1, k_2, \dots, k_M) = \frac{N!}{k_1! \cdot k_2! \cdot \dots \cdot k_M!}$ , переменные  $\lambda_i$ , вообще говоря, могут быть заданы не единственным способом.

Последовательность ОПБ функции  $f(x)$  сходится равномерно в конусе  $\Omega \in R^n$  к непрерывной функции  $f(x)$  [2].

**Теорема.** Для всякой непрерывной в конусе

$$\Omega = \left\{ \mathbf{x} \mid \mathbf{x} = \lambda_1(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{X}_1 + \lambda_2(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{X}_2 + \dots + \lambda_M(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{X}_M, \lambda_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^M \lambda_i = 1, \mathbf{X}_j \in R^n \right\},$$

функции  $f(\mathbf{x})$  при любом  $\varepsilon > 0$  существует  $P_N(\mathbf{x}) = \sum_{|\mathbf{k}|=N} f(\mathbf{x}_{\mathbf{k}}) \cdot (N; \mathbf{k}) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M}$  (ОПБ функции  $f(\mathbf{x})$  степени  $N$ ), такой, что при выполнении для его узлов  $\mathbf{x}_{\mathbf{k}}$  условия

$$\sum_{|\mathbf{k}|=N} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\mathbf{k}}\|_E^2 \cdot (N; \mathbf{k}) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M} \leq \frac{C}{N}, \quad (2)$$

где константа  $C$  не зависит от точки  $\mathbf{x}$ , справедливо

$$\max_{\mathbf{x} \in \Omega} |f(\mathbf{x}_{\mathbf{k}}) - P_N(\mathbf{x})| < \varepsilon. \quad (3)$$

Пусть исходные экспериментальные данные представлены таблицей  $Y = (y_{ij})$ ,  $i$  – номер наблюдения ( $i = 1, 2, 3, \dots, L$ ),  $j$  – номер наблюдаемого параметра в последовательности технологических параметров ( $j = 1, 2, 3, \dots, M - 1$ ). Введём следующую нормировку

$$\lambda_j^{(i)} = \frac{1}{k} \frac{y_{ij} - y_j^{min}}{y_j^{max} - y_j^{min}}, j = 1, 2, \dots, M - 1, \quad (4)$$

$$\lambda_M^{(i)} = 1 - \sum_{j=1}^{M-1} \lambda_j^{(i)},$$

$$y_j^{min} = \min_i y_{ij}, y_j^{max} = \max_i y_{ij}.$$

Параметр  $k$  выбирается так, чтобы все  $\lambda_M^{(i)}$  были больше нуля. Векторы с компонентами  $(\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}, \lambda_3^{(i)}, \dots, \lambda_M^{(i)})$ , вследствие выбранной нормировки лежат в конусе  $\Omega$  с вершинами

$$\begin{aligned} X_1 &= (1, 0, 0, \dots, 0, 0), \\ X_2 &= (0, 1, 0, \dots, 0, 0), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (5)$$

$$X_{M-1} = (0, 0, 0, \dots, 1, 0),$$

$$X_M = (0, 0, 0, \dots, 0, 1).$$

Функция принадлежности для точечного множества, определённого таблицей  $Y$ , имеет вид

$$\chi_Y(y) = \begin{cases} 1, & y \in Y, \\ 0, & y \notin Y. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь  $\mathbf{y}$   $M - 1$  компонентный вектор строка.

Выберем аппроксимацию функции принадлежности множества данных таблицы  $Y$  в виде ОПБ (1) степени  $N$

$$\chi_N(\mathbf{y}) = \sum_{|\mathbf{k}|=N} a_{\mathbf{k}} \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M}. \quad (7)$$

Здесь все коэффициенты  $a_{\mathbf{k}}$  должны быть неотрицательными, в силу неотрицательности функции  $\chi_Y(\mathbf{y})$ , а  $\lambda$  компоненты нормированного в соответствии с формулами (4) вектора данных. Коэффициенты  $a_{\mathbf{k}}$  подлежат определению из условия близости непрерыв-

ной аппроксимации (7) к дискретной функции (6).

Условие аппроксимации в интегральной норме  $\|\cdot\|_L = \int_{\Omega} |\cdot| d\Lambda$

$$\|\chi_N(y) - \chi_Y(y)\|_L \rightarrow \min \quad (8)$$

дополним требованиями удовлетворительного согласования значений аппроксимационной функции с данными из таблицы  $Y$

$$|\chi_N(y^{(i)}) - 1| \leq d, \quad i = 1, 2, 3, \dots, L. \quad (9)$$

Параметр  $d$  оценивает наибольшее уклонение для наилучшего приближения функции принадлежности.

Условие (8) после интегрирования запишется в виде

$$\frac{N!}{(N + M - 1)!} \cdot \sum_{|\mathbf{k}|=N} a_{\mathbf{k}} \rightarrow \min. \quad (10)$$

В (10) учтено, что все коэффициенты  $a_{\mathbf{k}}$  в представлении (7) являются неотрицательными числами и

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M} d\Lambda = \\ & = \int_0^1 \int_0^{1-\lambda_1} \dots \int_0^{1-\lambda_1-\dots-\lambda_{M-1}} (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M} d\lambda_m \dots d\lambda_2 d\lambda_1 = \\ & = \frac{N!}{(N + M - 1)!}. \end{aligned} \quad (11)$$

Задачу для определения неизвестных коэффициентов  $a_{\mathbf{k}}$  можно таким образом переформулировать в виде задачи линейного программирования

$$\sum_{|\mathbf{k}|=N} a_{\mathbf{k}} \rightarrow \min, \quad (12)$$

с ограничениями вида (9)

$$\sum_{|\mathbf{k}|=N} a_{\mathbf{k}} \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot (\lambda_1^i)^{k_1} \cdot (\lambda_2^i)^{k_2} \cdot \dots \cdot (\lambda_M^i)^{k_M} \leq 1 + d, \quad i = 1, 2, 3, \dots, L,$$

$$\sum_{|\mathbf{k}|=N} a_{\mathbf{k}} \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot (\lambda_1^i)^{k_1} \cdot (\lambda_2^i)^{k_2} \cdot \dots \cdot (\lambda_M^i)^{k_M} \geq 1 - d, \quad i = 1, 2, 3, \dots, L,$$

$$a_{\mathbf{k}} \geq 0.$$

Задача (12) заведомо имеет решение. В силу неотрицательности коэффициентов, целевая функция ограничена снизу нулём, а совместность системы ограничений можно обеспечить выбором в качестве  $d$  достаточно большого положительного числа.

Наименьшее числовое значение  $d$ , при котором существует решение задачи (12), даёт оценку снизу наибольшего уклонения для наилучшего приближения функции меры принадлежности к множеству, определяемому таблицей данных  $Y$ . В свою очередь, этот факт позволяет использовать  $d$  для оценки параметра  $\alpha$  для  $\alpha$ -среза исходного нечёткого множе-

ства  $A$ , представленного таблицей экспериментальных данных  $Y$ .

$$\chi_N(y) = A_\alpha(y), \text{ при } \alpha \leq 1 - d. \quad (14)$$

Ограничения на величину  $\alpha$  определяются как точностью измерения, так и плотностью данных в исходном множестве. Удовлетворительный результат, как следует из **Теоремы**, следует ожидать, если данные образуют  $\varepsilon$ -сеть в исходном нечётком множестве, и степень ОПБ  $N$  достаточно высока.

Предложенный способ построения  $\alpha$ -срезов нечётких множеств указывает на возможность применения некоторых процедур нечёткой логики для уменьшения вычислительной трудоёмкости решения задачи линейного программирования (12). Рассмотрим некоторые из них.

**1. Табличные данные содержат слабосвязанные между собой группы столбцов.**

На языке теории множеств это означает возможность представить исходное множество прямым произведением множеств меньшей размерности

$$A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_m.$$

В этом случае, построение  $\alpha$ -срезов можно проводить отдельно для групп столбцов, соответствующих множествам  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . «Склейка» функций проводится по правилам теории нечётких множеств

$$\chi_A(y) = \chi_{A_1}(y_1) \cdot \chi_{A_2}(y_2) \cdot \dots \cdot \chi_{A_m}(y_m).$$

**2. Группы строк таблицы данных локализованы в отдельных областях множества  $A$ .**

На языке теории множеств это означает возможность представить исходное множество разбиением

$$A = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_m, \quad A_i \cap A_j = \emptyset, \quad i \neq j.$$

Для этого случая упрощение построения  $\alpha$ -срезов происходит за счёт понижения степеней ОПБ, аппроксимирующих  $\alpha$ -срезы множеств  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . Для описаний отдельной группы данных с той же точностью можно использовать полином меньшей степени. «Склейка» функций проводится по следующему правилу

$$\chi_A(y) = \chi_{A_1}(y_1) + \chi_{A_2}(y_2) + \dots + \chi_{A_m}(y_m).$$

Размерность задачи линейного программирования существенно влияет на трудоёмкость построения решения. Вычислительная сложность, например, симплекс-метода Данцига для решения задачи линейного программирования является экспоненциальной.

Дальнейшие упрощения вычислений при манипулировании данными могут быть получены на основании основных правил нечёткой логики. Характеристические функции для нечёткой дизъюнкции и конъюнкции получаются так

$$\chi_{A \cup B}(y) = \max(\chi_A(y), \chi_B(y)), \quad \chi_{A \cap B}(y) = \min(\chi_A(y), \chi_B(y)).$$

Для функций  $\alpha$ -срезов множеств, представленных при помощи ОПБ,

$$\begin{aligned}
 \chi_{A \cup B}(\mathbf{y}) &= \sum_{|\mathbf{k}|=N} c_{\mathbf{k}} \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M}, \\
 \chi_{A \cap B}(\mathbf{y}) &= \sum_{|\mathbf{k}|=N} f_{\mathbf{k}} \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M}, \\
 \chi_A(\mathbf{y}) &= \sum_{|\mathbf{k}|=N} a_{\mathbf{k}} \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M}, \\
 \chi_B(\mathbf{y}) &= \sum_{|\mathbf{k}|=N} b_{\mathbf{k}} \cdot (N; k_1, k_2, \dots, k_M) \cdot \lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{k_2} \cdot \dots \cdot \lambda_M^{k_M},
 \end{aligned} \tag{17}$$

эта операция выполняется почленно, так  $c_k = \max(a_k, b_k)$  – для дизъюнкции и  $f_k = \min(a_k, b_k)$  – для конъюнкции.

**Пример.** Рассмотрим пример построения  $\alpha$ -среза для таблицы модельных данных. Данные, расположенные в первых трёх столбцах, независимы между собой. Остальные столбцы сформированы по правилам

$$\begin{aligned}
 y_4 &= y_1 + y_2 + y_3, \\
 y_5 &= y_1 \cdot y_2 + 2 \cdot (y_1 + y_2) \cdot y_3, \\
 y_6 &= y_1 \cdot y_2 \cdot y_3, \\
 y_7 &= \sqrt{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2}, \\
 y_8 &= 1 - \sum_{i=1}^7 y_i.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Модельные данные нормированы  $\sum_{k=1}^8 y_{i,k} = 1$ .

$i$	$y_{i1}$	$y_{i2}$	$y_{i3}$	$y_{i4}$	$y_{i5}$	$y_{i6}$	$y_{i7}$	$y_{i8}$
1	0,009	0,132	0,093	0,234	0,162	0,0274	0,00011	0,343
2	0,117	0,009	0,213	0,339	0,243	0,0547	0,000224	0,0239
3	0,042	0,189	0,045	0,276	0,199	0,0287	0,000357	0,22
4	0,039	0,138	0,144	0,321	0,203	0,0564	0,000775	0,0976
5	0,045	0,096	0,003	0,144	0,106	0,00517	0,000013	0,601
6	0,081	0,087	0,036	0,204	0,124	0,0191	0,000254	0,448
7	0,051	0,024	0,183	0,258	0,191	0,0287	0,000224	0,264
8	0,006	0,234	0,006	0,246	0,234	0,00428	$8,42 \cdot 10^{-6}$	0,27
9	0,03	0,15	0,057	0,237	0,163	0,025	0,000256	0,337
10	0,273	0,015	0,027	0,315	0,275	0,0196	0,000111	0,0755

После решения задачи (12) для данных из таблицы при  $d = 0,000001$ , найдём вид модели первого порядка

$$0,673 \cdot 10^{-5} y_1 + 0,933 \cdot 10^{-5} y_2 + 2,00 y_4 + 1,00 y_5 + 1,00 y_6 + 0,922 y_7 + 1,00 y_8 = 1. \tag{19}$$

Если учесть второе из соотношений (4), для дополняющей переменной  $y_8$ , зависимость (19) примет вид

$$y_4 = 1,00 y_1 + 1,00 y_2 + 1,00 y_3 + 0,008 y_7. \tag{20}$$

Зависимость (20) практически повторяет первое правило из (18).

Для построения модели второго порядка, которая содержит 36 коэффициентов, объём таблицы следует увеличить. Так, при объёме таблицы в 40 строк получим модель



$$\begin{aligned}
 & 1,07y_2y_3 + 0,402 \cdot 10^{-2}y_2y_5 + 4,00y_4y_8 + 0,210 \cdot 10^{-3}y_2y_8 + \\
 & + 3,98y_4y_5 + 0,0448y_1y_7 + 0,928y_6y_8 + 1,79y_4y_6 + 0,978y_5y_6 + \\
 & + 0,000184y_1y_8 + 2,00y_5y_8 + 4,74y_4y_7 + 0,00918y_2y_6 + 1,08y_1y_3 + \\
 & + 0,00696y_1y_6 + 1,92y_7y_8 + 1,16y_5y_7 + 0,00416y_3y_4 + 0,00328y_1y_5 + \\
 & + 0,000692y_1^2 + 4,54y_4^2 + 1,00y_8^2 + 0,467y_5^2 = 1.
 \end{aligned} \tag{22}$$

В этой модели второго порядка проявляется помимо первого правила из (18), второе и четвёртое правило. Дальнейшее повышение порядка модели позволяет обнаружить все зависимости, присутствующие в табличных данных.

В примере величина  $d$  для модельных данных выбиралась весьма малой. Если бы данные содержали погрешность, то выбор величины  $d$  следовало бы подчинить правилу — недопустимо выбирать  $d$  меньше, чем погрешность измерений.

Следует отметить, что если данные не содержат зависимостей, то с повышением порядка моделей обнаруживается стремление описаний к «тривиальному» правилу

$$(y_1 + y_2 + \dots y_8)^N = 1.$$

**Заключение.** Предложенный подход к построению математического описания табличных комплексов технологических данных позволяет получать удобные, с точки зрения возможностей автоматизации обработки данных, описания данных произвольного объёма. Средствами нечёткой логики может быть проведён анализ моделей данных с целью обнаружения возможных зависимостей в данных. Реализуемость идей, изложенных в статье, подтверждает практический пример применения предложенных подходов к моделированию экспериментальных данных, который позволил построить модель технологических данных по группе скважин одного из газовых месторождений юга России [1]. Данные включали в себя дебит отдельных газовых скважин, эксплуатационные показатели давления и другие параметры, всего более 12 параметров. По выборке из более 300 данных средствами нечёткой логики было построено описание модели действующих скважин для конкретного газового месторождения.

Объём таблицы данных в 300 строк позволил построить модель скважин месторождения 4-го порядка, которая содержала около 2500 коэффициентов. Расчёт на ПК с процессором Intel Core i7 3.4GHz занял по времени несколько минут.

### Список литературы

1. Бондаренко М. А. Методы математического моделирования в задачах оптимального управления технологическими процессами интеллектуального месторождения // Новые технологии в газовой промышленности: тезисы докладов 11-й Всерос. конф. молодых учёных, специалистов и студентов. М.: РГУ им. И. М. Губкина, 2015. С. 286.
2. Захаров В. В., Кравцов А. М., Прийменко С. А. Обобщения полиномов Бернштейна в задачах многокритериальной оптимизации // Наука и мир. 2014. Т. 1, № 2.
3. Wang L. X. A Course in Fuzzy Systems and Control. Prentice-Hall International, Inc., 1994.

*Статья поступила в редакцию 10.04.2017; принята к публикации 25.04.2017*

**Библиографическое описание статьи**

Толпаев В. А., Кравцов А. М., Петросяни М. Т., Бондаренко М. А. Одна задача аппроксимации комплексов технологических данных методами нечёткой логики // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 15–23. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-15-23.

**Vladimir A. Tolpaev,**

*Doctor of Physics and Mathematics,  
Research and Design Institute of Natural Gases  
(419 Lenina st., Stavropol, 355035, Russia),  
e-mail: TolpaevVA@scnipigaz.ru*

**Aleksandr M. Kravtsov,**

*Candidate of Physics and Mathematics,  
Research and Design Institute of Natural Gases  
(419 Lenina st., Stavropol, 355035, Russia),  
e-mail: alex\_k@bk.ru*

**Musheg T. Petrosyants,**

*Junior Researcher, Postgraduate Student,  
Laboratory of Reservoir Hydrodynamics,  
North-Caucasus Research and Design Institute of Natural Gases  
(419 Lenina st., Stavropol, 355035, Russia),  
e-mail: musheg901@mail.ru*

**Maria A. Bondarenko,**

*Junior Researcher, Postgraduate Student,  
Laboratory of Underground Hydrodynamics,  
North-Caucasian Research and Design Institute of Natural Gases  
(419 Lenina st., Stavropol, 355035, Russia),  
e-mail: TolpaevVA@scnipigaz.ru*

## **One Problem of the Approximation of Process Data Set by Methods of Fuzzy Logic**

We study the problem of approximation of tabular data with the same large size lines. We suggest a formulation of the problem in terms of fuzzy sets and approximate way of describing the  $\alpha$  – slices of fuzzy sets of special polynomial functions – Bernstein polynomial for the case of several variables. An approximate algorithm for solving the problem allowing the decomposition of the original problem is an example of his work. We give estimates for the number of characteristics of the approximate function data table. The study provides empirical assessments of the time complexity of the algorithm for a number of practical applications of the algorithm.

**Keywords:** tab functions, detect dependencies in the data, the simplex method, decomposition approximation problem

### **References**

1. Bondarenko M. A. Metody matematicheskogo modelirovaniya v zadachakh optimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami intellektual'nogo mestorozhdeniya // Novye tekhnologii v gazovoi promyshlennosti: tezisy dokladov 11-i Vseros. konf. molodykh uchenykh, spetsialistov i studentov. M.: RGU im. I. M. Gubkina, 2015. S. 286.

2. Zakharov V. V., Kravtsov A. M., Priimenko S. A. Obobshcheniya polinomov Bernshteina v zadachakh mnogokriterial'noi optimizatsii // Nauka i mir. 2014. T. 1, № 2.

3. Wang L. X. A Course in Fuzzy Systems and Control. Prentice-Hall International, Inc., 1994.

*Received: April 10, 2017; accepted for publication April 25, 2017*

**Reference to article**

*Tolpayev V. A., Kravtsov A. M., Petrosyants M. T., Bondarenko M. A* One Problem of the Approximation of Process Data Set by Methods of Fuzzy Logic // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No. 4. PP. 15–23. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-15-23.

УДК 517.958

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-24-28

*Святослав Евгеньевич Холодовский,*  
*доктор физико-математических наук, профессор,*  
*Забайкальский государственный университет,*  
*(672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30)*  
*e-mail: hol47@yandex.ru*

### О решении краевых задач для неоднородных дифференциальных уравнений в полуцилиндрах, ограниченных двухслойной плёнкой

В статье рассмотрен класс краевых задач в полуцилиндрах  $D = (x < 0) \times (y \in Q \subseteq R^m)$ , ограниченных по основанию  $x = 0$  двухслойной плёнкой, состоящей из сильно- и слабо проницаемых прослоек. На плёнке задано однородное граничное условие первого типа. В полуцилиндре рассмотрены неоднородные дифференциальные уравнения определённого класса. С помощью метода свёртывания разложений Фурье решения задач с плёнкой выражены через решения классических задач в цилиндре  $D_0 = (x \in R) \times (y \in Q \subseteq R^m)$  (без плёнки) с сохранением уравнения в  $D$ .

**Ключевые слова:** краевые задачи, двухслойные плёнки, обобщённые граничные условия

В современных условиях широкие приложения имеют композитные материалы, содержащие многослойные плёночные покрытия. Расчёт динамических процессов в указанных материалах приводит к краевым задачам математической физики в областях, ограниченных многослойными плёнками.

В статье [3] разработан метод решения краевых задач в областях с многослойными плёночными включениями. В статье [4] указанный метод применён к решению краевых задач для однородных дифференциальных уравнений в полупространстве, ограниченном многослойной плёнкой, при неоднородных граничных условиях на плёнке. В настоящей статье данный метод применяется к решению краевых задач для неоднородных уравнений в полуцилиндрах, ограниченных по основанию многослойной плёнкой, с однородным граничным условием на плёнке первого типа, т. е. когда на внешней стороне плёнки заданы значения искомого решения. Метод иллюстрируется на примере определённого достаточно широкого класса линейных неоднородных уравнений в полуцилиндре, ограниченном двухслойной плёнкой.

Рассмотрим для функции  $u(x, y)$  в полуцилиндре  $D = (-\infty < x < 0) \times (y \in Q \subseteq R^m)$  класс краевых задач вида

$$\partial_x^2 u + Lu = H(x, y), \quad Mu|_{(x,y) \in S} = h(x, y), \quad (1)$$

$$u + B\partial_x u + AB\partial_x^2 u|_{x=0} = 0, \quad (2)$$

где  $u(x, y) = O(1)$ ,  $\partial_x^i = \partial^i / \partial x^i$ ,  $H(x, y) = 0$  в окрестности  $x = 0$ ,  $L$  – линейный дифференциальный оператор по переменным  $y_i$ ,  $y = (y_1, \dots, y_m)$ , т. е. оператор  $L$  не содержит производных по  $x$  и коэффициенты при производных не зависят от  $x$ ;  $S = (x < 0) \times (y \in \partial Q)$  –

боковая поверхность полуцилиндра  $D$ ;  $M$  – оператор граничных условий первого, или второго, или третьего рода по  $y$ . Здесь полуцилиндр  $D$  ограничен двухслойной плёнкой, состоящей из сильно проницаемой прослойки  $x = -0$  с параметром  $A$  и слабо проницаемой прослойки  $x = +0$  с параметром  $B$  [4].

Далее операторы  $L$  и  $M$ , а также функции  $H(x, y)$  и  $h(x, y)$  считаются такими, для которых аналогичная классическая задача в цилиндре  $D_0 = (-\infty < x < \infty) \times (y \in Q \subseteq R^m)$  без плёнки вида

$$\partial_x^2 f + Lf = \begin{cases} H(x, y), & x < 0, \\ 0 & x \geq 0, \end{cases} \quad Mf|_S = \begin{cases} h(x, y), & x < 0, \\ 0 & x \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

корректна в классе достаточно дифференцируемых функций. При этом функция  $f(x, y)$  предполагается ограниченной в полуцилиндре  $D_1(x \geq 0)$  (где она удовлетворяет однородным условиям (1)).

Выразим решение задачи (1), (2) с плёнкой через решение классической задачи (3). Для вывода общих формул применим метод свёртывания разложений Фурье [1; 3 ; 4]. В соответствии с указанным методом рассмотрим частные модельные случаи задач (1)–(3), допускающие применение метода Фурье. В качестве модельных задач рассмотрим простейшие случаи задач (1)–(3) для оператора Лапласа в полуплоскости  $x < 0$

$$\Delta u = H(x, y), \quad x < 0 \quad (4)$$

при выполнении граничного условия (2) на плёнке  $x = 0$  и соответствующую задачу на всей плоскости  $R^2$

$$\Delta f = \begin{cases} H(x, y), & x < 0, \\ 0 & x \geq 0, \end{cases} \quad |f| = O(1), \quad x^2 + y^2 \rightarrow \infty, \quad (5)$$

где  $\Delta = \partial_x^2 + \partial_y^2$ ,  $H \in C(x > 0)$ . Выразим решение задачи (4), (2) через решение  $f(x, y)$  классической задачи (5).

Предположим сначала, что функция  $f(0, y)$  разлагается в интеграл Фурье с коэффициентами Фурье  $f_i(\lambda)$  [2, с. 529]

$$f(0, y) = \int_0^\infty g(y, \lambda) d\lambda, \quad g(y, \lambda) = f_1(\lambda) \sin \lambda y + f_2(\lambda) \cos \lambda y, \quad (6)$$

где

$$f_i(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^\infty f(0, y) \sigma_i(y, \lambda) dy, \quad f(0, y) \rightarrow 0, \quad |y| \rightarrow \infty,$$

$\sigma_1(y, \lambda) = \sin \lambda y$ ,  $\sigma_2(y, \lambda) = \cos \lambda y$ . Отсюда функция  $f(x, y)$  в полуплоскости  $x \geq 0$ , где она удовлетворяет уравнению Лапласа (5), представима в виде

$$f(x, y) = \int_0^\infty e^{-\lambda x} g(y, \lambda) d\lambda, \quad x \geq 0. \quad (7)$$

Здесь левая и правая части последнего равенства являются ограниченными решениями однозначно разрешимой задачи Дирихле в полуплоскости:  $\Delta u = 0$ ,  $x > 0$ ,  $u|_{x=0} = f(0, y)$ .

Представим решение модельной задачи с плёнкой (4), (2) также в виде разложения Фурье

$$u(x, y) = f(x, y) + \int_0^\infty a(\lambda)e^{\lambda x}g(y, \lambda) d\lambda, \quad x < 0, \quad (8)$$

где функция  $g(y, \lambda)$  имеет вид (6),  $a(\lambda)$  – неизвестная функция. Отсюда функция  $u(x, y)$  (8) удовлетворяет уравнению (4) (при условии сходимости и дифференцируемости интеграла).

Из граничного условия (2) с учётом (7) находим

$$a(\lambda) = -1 + \frac{2B\lambda}{d(\lambda)}, \quad (9)$$

где  $d(\lambda) = AB\lambda^2 + B\lambda + 1$ , при этом  $d(\lambda) > 0$  при  $\lambda \geq 0$ . Отсюда интеграл (8) и его производные мажорируются интегралом (7) и его соответствующими производными, т. е. интеграл (8) сходится и допускает дифференцирование необходимое число раз. Раскладывая правильную дробь (9) на простейшие дроби, получим

$$a(\lambda) = -1 + \frac{2B}{\sqrt{T}} \left( \frac{\gamma_2}{\lambda + \gamma_2} - \frac{\gamma_1}{\lambda + \gamma_1} \right), \quad T \neq 0; \quad (10)$$

$$a(\lambda) = -1 + \frac{2}{A} \left[ \frac{1}{\lambda + \gamma_0} - \frac{\gamma_0}{(\lambda + \gamma_0)^2} \right], \quad T = 0, \quad (11)$$

где

$$T = B(B - 4A), \quad \gamma_i = \frac{B + (-1)^i \sqrt{T}}{2AB}, \quad i = 1, 2; \quad \gamma_0 = \frac{1}{2A}, \quad (12)$$

при этом  $AB\gamma_i^2 - B\gamma_i + 1 = 0$ ,  $i = 0, 1, 2$ .

Из разложения функции  $f(x, y)$  (7) следует равенство  $f(x + t, y) = \int_0^\infty e^{-\lambda(x+t)}g d\lambda$  при  $x \geq 0$ ,  $t > 0$ . Умножая это равенство на  $e^{-\gamma t}t^n$  и интегрируя по  $t \in (0, \infty)$ , с учётом  $\int_0^\infty e^{-at}t^n dt = n!a^{-n-1}$  получим формулу

$$\frac{1}{n!} \int_0^\infty e^{-\gamma t}t^n f(x + t, y) dt = \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda x}g(y, \lambda)}{(\lambda + \gamma)^{n+1}} d\lambda, \quad x \geq 0,$$

где  $\operatorname{Re} \gamma > 0$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $g(y, \lambda)$  имеет вид (6). Отсюда с учётом (8), (10), (11) решение  $u(x, y)$  задачи (4), (2) приведём к виду без разложений Фурье

$$u(x, y) = f(x, y) - f(-x, y) + \frac{2B}{\sqrt{T}} \int_0^\infty f(-x + t, y) (\gamma_2 e^{-\gamma_2 t} - \gamma_1 e^{-\gamma_1 t}) dt, \quad B \neq 4A, \quad (13)$$

$$u(x, y) = f(x, y) - f(-x, y) + \frac{2}{A} \int_0^\infty f(-x + t, y) e^{-\gamma_0 t} (1 - \gamma_0 t) dt, \quad B = 4A. \quad (14)$$



При  $T < 0$  функция (13) действительна и имеет вид

$$u(x, y) = f(x, y) - f(-x, y) + \frac{4B}{\sqrt{|T|}} \int_0^\infty f(-x + t, y) e^{-\alpha t} (\beta \cos \beta t - \alpha \sin \beta t) dt,$$

где  $\alpha = 1/(2A)$ ,  $\beta = \sqrt{|T|}/(2AB)$ .

Полученные формулы (13), (14) справедливы для общего случая задач (1)–(3). Действительно, правые части формул (13), (14) являются операторами, действующими на функцию  $f(x, y)$  по одной переменной  $x$  ( $y$  – свободная переменная). В силу  $\operatorname{Re} \gamma_i > 0$ ,  $i = 0, 1, 2$  (12) интегралы (13), (14) сходятся и допускают дифференцирование необходимое число раз, при этом учитываем ограниченность функции  $f(x, y)$  в полуцилиндре  $D_1(x \geq 0)$ .

Аргументы функции  $f(x, y)$  в формулах (13), (14), кроме первого слагаемого, принадлежат полуцилиндру  $D_1(x > 0)$ , где условия задачи (3) для функции  $f(x, y)$  однородны. При этом если функция  $f(x, y)$  удовлетворяет однородному уравнению (3)  $\partial_x^2 f + Lf = 0$  при  $x > 0$ , то функция  $f(-x, y)$  удовлетворяет этому уравнению при  $x < 0$ . Отсюда условия задачи (1), (2) с учётом условий (3) для функции  $f(x, y)$  проверяются непосредственно.

Таким образом, если известно решение  $f(x, y)$  некоторой задачи (3) в неограниченном по переменной  $x$  цилиндре  $D_0 = (x \in R) \times (y \in Q \subseteq R^m)$ , то по формулам (13), (14) получаем решение аналогичной задачи (1), (2) в полуцилиндре  $D = (x < 0) \times (y \in Q \subseteq R^m)$ , ограниченном двухслойной плёнкой  $x = 0$ .

Например, фундаментальные решения для уравнения Лапласа на всей плоскости  $P_0 = R^2$ , в полуплоскости  $P_1 = (x \in R) \times (0 < y < \infty)$  и в полосе  $P_2 = (x \in R) \times (0 < y < \pi)$  с однородными граничными условиями Дирихле на  $\partial P_{1,2}$  имеют соответственно вид

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi} \ln[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2], \quad x_0 < 0,$$

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{(x - x_0)^2 + (y + y_0)^2}, \quad x_0 < 0, \quad y_0 > 0$$

и

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{\operatorname{ch}(x - x_0) - \cos(y - y_0)}{\operatorname{ch}(x - x_0) - \cos(y + y_0)}, \quad x_0 < 0, \quad 0 < y_0 < \pi,$$

при этом функция  $f(x, y)$  в соответствующей области удовлетворяет условиям  $\Delta f = \delta(x - x_0, y - y_0)$ ,  $f|_{\partial P_{1,2}} = 0$ , где  $\delta(x, y)$  – функция Дирака. Тогда фундаментальные решения аналогичных задач в областях  $P_j \cap (x < 0)$ ,  $j = 0, 1, 2$ , ограниченных двухслойной плёнкой  $x = 0$  с однородным граничным условием (2) строятся по соответствующим формулам (13), (14).

### Список литературы

1. Холодовский С. Е. Задачи математической физики в областях с плёночными включениями и плёночными границами. Чита: ЗабГУ, 2017. 234 с.
2. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Наука, 1962. Т. 3. 656 с.

3. Kholodovskii S. E. The Convolution Method of Fourier Expansions. The Case of Generalized Transmission Conditions of Crack (Screen) Type in Piecewise Inhomogeneous Media // Differential Equations. 2009. Vol. 45, No. 6. P. 873–877.

4. Kholodovskii S. E. On multilayer films on the boundary of a half-space // Mathematical Notes. 2016. Vol. 99, No. 3. P. 426–431.

*Статья поступила в редакцию 15.05.2017; принята к публикации 29.05.2017*

#### **Библиографическое описание статьи**

Холодовский С. Е. О решении краевых задач для неоднородных дифференциальных уравнений в полуцилиндрах, ограниченных двухслойной плёнкой // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 24–28. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-24-28.

*Svyatoslav Ye. Kholodovskii,  
Doctor of Physics and Mathematics, Professor,  
Transbaikal State University  
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, Russia, 672039),  
e-mail: hol47@yandex.ru*

#### **Regarding the Solution of Boundary Value Problems for Nonhomogeneous Differential Equations in Half-Cylinders Bounded Two-Layer Film**

In the article we consider a class of boundary value problems in the half-cylinders  $D = (x < 0) \times (y \in Q \subseteq R^m)$  bounded on the basis  $x = 0$  of the two-layer film composed of strongly and weakly permeable layers. On the film we set a homogeneous boundary condition of the first type. In the half-cylinder we consider nonhomogeneous differential equations of a certain class. Using the method of convolution of Fourier expansions the solutions problems with film are expressed through the solutions of the classical problems in the cylinder  $D_0 = (x \in R) \times (y \in Q \subseteq R^m)$  without film with conservation of equation in  $D$ .

**Keywords:** boundary value problem, two-layer films, the generalized boundary conditions

#### **References**

1. Kholodovskii S. E. Zadachi matematicheskoi fiziki v oblastiakh s plnochnymi vklucheniymi i plnochnymi granitsami. Chita: ZabGU, 2017. 234 s.

2. Fikhtengol'ts G. M. Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya. M.: Nauka, 1962. T. 3. 656 s.

3. Kholodovskii S. E. The Convolution Method of Fourier Expansions. The Case of Generalized Transmission Conditions of Crack (Screen) Type in Piecewise Inhomogeneous Media // Differential Equations. 2009. Vol. 45, No. 6. P. 873–877.

4. Kholodovskii S. E. On multilayer films on the boundary of a half-space // Mathematical Notes. 2016. Vol. 99, No. 3. P. 426–431.

*Received: May 15, 2017; accepted for publication May 29, 2017*

#### **Reference to article**

Kholodovskii S. Ye. Regarding the Solution of Boundary Value Problems for Nonhomogeneous Differential Equations in Half-Cylinders Bounded Two-Layer Film // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No. 4. PP. 24–28. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-24-28.

**ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТ**  
**ENGINEERING. TECHNOLOGY. EXPERIMENT**

**УДК 614.8:551.910.3 + 796.01**  
**DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-29-37**

***Виталий Иосифович Акселевич,**  
кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий геофизик,  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
(194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7),  
e-mail: vaksster@gmail.com*

***Геннадий Иванович Мазуров,**  
доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник,  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
(194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7),  
e-mail: nanmaz@rambler.ru*

***Камиль Шейхович Хайруллин,**  
кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник,  
лауреат премии А.И. Воейкова по климатологии,  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
(194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7),  
e-mail: khairullink@mail.ru*

**Гидрометеорологические опасности Арктики и методика их мониторинга**

Статья посвящена описанию природных опасностей и особенностям работ в Арктической зоне. Рассматривается методика их мониторинга. Описываются новые опасные явления, такие, как ледяное цунами, подъём метана при размораживании вечной мерзлоты, подъём уровня Мирового океана, увеличение скорости эрозии берегов Северного Ледовитого океана. Дискутируется вопрос о глобальном потеплении и похолодании.

**Ключевые слова:** мониторинг, Арктическая зона, изменение температуры, ледяное цунами, метан, сокращение площади льдов, подъём уровня Мирового океана

Под Арктикой будем в соответствии с [10] понимать северную околополюсную область Земного шара, включающую Северный Ледовитый океан, его моря и острова, а также прилегающие участки материков Евразии и Северной Америки. Границы арктического региона России представлены на рис. 1 [10].

Для большинства территорий за полярным кругом характерны следующие гидрометеорологические особенности [8]:

– полярная ночь и полярный день длительностью 3–5 месяцев, оказывающие отрицательное влияние на психику человека;

- северное сияние, магнитные бури и другие геомагнитные параметры [9], нарушающие радиосвязь за счёт помех радиотехническим средствам;
- низкие температуры воздуха во время полярной ночи в сочетании с сильными ветрами создают крайне неблагоприятные условия для проживания и несения службы;
- резкая изменчивость условий погоды во времени и по пространству из-за влияния местных особенностей;
- практическое отсутствие пыли, что обуславливает высокую прозрачность воздуха;
- сильные ветры (до 40 м/с), вызывающие метели и создающие снежные заносы и ледяные торосы;
- высокая повторяемость инверсий и изотермий, под которыми возникают дымки, туманы и низкая облачность, ухудшающие видимость;
- редкие метеорологическая, аэрологическая и радиолокационная сети;
- малое количество аэродромов и пунктов базирования;
- однообразная заснеженная и ледяная поверхность, крайне бедная ориентирами;
- белая мгла вследствие размытия контраста в атмосфере над большими водными пространствами [1].



**Рис. 1.** Границы арктического региона России (закрашены синим цветом и 9 районов пронумерованы) [10]

**Fig. 1.** The boundaries of the Arctic region of Russia

Все эти особенности и другие редко встречающиеся опасные явления затрудняют пространственную ориентировку при полётах экипажей летательных аппаратов, особенно при полётах на малых и предельно малых высотах.

Существуют определённые методики организации мониторинга опасностей и их купирования. Для обеспечения нормальной радиосвязи требуется осуществлять прогноз её распространения. Считается, что для осуществления такого прогноза нужны данные о солнечной активности и состоянии верхних слоёв атмосферы. Среди параметров солнечной активности выделяют:

- уровень ионизации слоя F (его значения бывают от 62.5 до 300, при этом, чем больше указанное число, тем выше ионизация и тем больше вероятность проведения связи на более высокочастотных диапазонах);
- индукция магнитного поля Земли;
- индекс неустойчивости в горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (его значения бывают от 0 до 9);

- вспышечная активность Солнца;
- интенсивность жёстких рентгеновских лучей, поражающих ионосферу Земли (их воздействие ведётся в первую очередь на D-слой или слой ВЧ поглощения, а значения указанной интенсивности от А0.0 до Х9.9 указывают на порядок величины X-лучей (А, В, С, М и Х), где А является самым низким классом);
- количество пятен на Солнце;
- относительная сила суммарной солнечной радиации на длине волны 30,4 нм, излучаемой в первую очередь ионизованным гелием в фотосфере Солнца (данное излучение ответственно за половину всех ионизаций слоя F в ионосфере; значения указанной силы бывают от 0 до бесконечности);
- плотности заряженных протонов и электронов в солнечном ветре (чем выше плотность, тем больше воздействие на ионосферу, что влияет на E-слой ионосферы; значения указанных плотностей бывают от 0 до бесконечности);
- насколько сильно F-слой ионизирован в полярных регионах (более высокие значения ионизации приводят к Авроре; они бывают от 0 до 150, при этом расчётное значение составляет от 67,5 до 45,0 градусов и оно используется для оценки широты полярных сияний);
- скорость заряженных частиц, с которой они приходят на Землю (чем выше скорость, тем больше давление оказывается на ионосферу, при этом значения, большие 500 км/с, оказывают влияние на ВЧ-связь);
- сила и направление межпланетного магнитного поля под влиянием солнечной активности (значения силы бывают от +50 до -50);
- рассчитанное значение состояния магнитного поля Земли;
- расчётное значение, указывающее сколько шума в S-блоках генерируется в результате взаимодействия между солнечным ветром и геомагнитной активностью (чем больше активность солнечного ветра, тем больше шума).

Магнитные бури прогнозируются и фиксируются с помощью мониторинга ионосферы. Для Арктики актуальны местные прогнозы сильного ветра, связанные с местными особенностями. Для прогноза и выявления инверсий и изотермий рекомендуется оснащение метеоподразделений на арктических аэродромах профилемерами типа МТП-5, МТП-6.

Для арктических аэродромов требуется установка доплеровских МРЛ и малогабаритных аэрологических и радиолокационных комплексов. Среди опасностей для морского флота следует перечислить:

- интенсивное обледенение морских судов;
- дрейф под воздействием ледяных полей;
- смыкание льдов большой толщины;
- отсутствие открытой воды на значительных акваториях в течение длительного времени, затрудняющее всплытие подводных лодок.

Обледенение более опасно для малых судов, чем для больших. Мерой предупреждения обледенения является покрытие судна каким-либо видом антифриза, который наносят на надводную поверхность при помощи кистей или распылителем.

Независимо от того, будет покрыто судно антифризом или нет, перед выходом в море, когда ожидается обледенение, необходимо:

- 1) обеспечить быстрое удаление воды с палубы;
- 2) проверить крепление брезентов на люках грузовых трюмов и бункерных люках, а также крепление чехлов на шлюпках и палубных вспомогательных механизмах;
- 3) для облегчения удаления льда на люках сверх брезентов следует положить доски и закрыть все палубные вспомогательные механизмы чехлами;
- 4) приготовить инструмент для околки и уборки льда (ломы, пешни, топоры, лопаты и метелки);

- 5) прочистить шпигаты и поднять или убрать крышки штормовых полупортиков;
- 6) весь наружный трубопровод должен быть осушен;
- 7) подготовить шланги для смывания льда горячей водой; для этой цели можно использовать и забортную воду, если температура её выше нуля;
- 8) протянуть леера, за которые будут держаться люди во время околки льда;
- 9) систематически убирать выпавший снег, не давая ему слёживаться в плотную массу;
- 10) наиболее действенной мерой предупреждения обледенения являются уменьшение скорости движения судна и приведение его в бейдевинд по отношению к волнению. При невозможности лечь в бейдевинд ложатся по волне, имея такой ход, чтобы обеспечить судну управляемость и отсутствие наката на палубу с кормы.

Околку льда надо начинать сразу же, как только замечено нарастание слоя льда, а не тогда, когда толщина льда достигнет уже достаточной величины.

Своевременное применение горячей воды для смывания только что образовавшегося льда может быть очень эффективным. При работе ломиками, пешнями, топорами необходимо наблюдать за тем, чтобы не повредить электропроводку и трубопроводы. В 1955 году в Англии и Норвегии производились опыты по борьбе с обледенением на небольших рыболовных судах методом обогрева поверхностей, подвергающихся обледенению, и методом покрытия этих поверхностей слоем резинообразного материала, на котором лед не образуется. Эти опыты продолжаются на научно-исследовательском судне в Норвегии. Целесообразно организовать подобные исследования в РФ.

К сожалению, климат Арктики подвержен резким изменениям. Соответственно появляются новые опасные явления погоды (ОЯП) [4].

Климат меняется, и одной из важнейших опасностей является угроза подъёма уровня Мирового океана [7].

В конечном счёте средняя температура воздуха медленно повышается, а объёмы ледников Гренландии и Антарктиды уменьшаются. Уровень Мирового океана растёт по 3 мм в год. К сожалению, эта скорость увеличивается. Такое развитие природных процессов может привести к уменьшению площади островов в Северном Ледовитом океане, а некоторые из них и вовсе могут исчезнуть.

Появились и новые опасные гидрометеорологические явления [6].

Шокирующее цунами изо льда обрушилось в центральной части Канады и на севере США в январе 2014 года, вынудив жителей в панике покинуть свои дома (рис. 2).



*Рис. 2.* Цунами изо льда  
*Fig. 2.* Tsunami of ice



Ледяные волны вышли на берег, словно замедленное замёрзшее цунами, пройдя по лужайкам и достигнув прибрежных домов.

Ледяное цунами было вызвано сильным ветром, который достигал скорости 60 км/ч, и поднялся с южного побережья озера Милле Лакс — второго самого большого озера штата Миннесота, США.

Похожее событие произошло через несколько дней в канадской провинции Манитоба, где ветер поднял груды льда в озере Дофин, разрушив 6 домов и повредив около 14. Чудом никто из жителей не пострадал. Люди рассказывали о том, что слышали звук, похожий на звук проходящего поезда, и мгновенно лёд заполнил дома.

Слой льда покрыл 16 км береговой линии и достиг 9 метровой высоты, повредив отдельные дома полностью, а в некоторых – двери и окна [14].

Ещё одна опасность связана с парниковым газом метаном ( $\text{CH}_4$ ). В Северном Ледовитом океане слой гидратов метана начинается на глубине 20–50 метров ниже морского дна.

Этот феномен был обнаружен в 2010 году сотрудниками Университета Аляски Натальей Шаховой и Игорем Семилетовым во время арктической экспедиции. После обработки результатов исследования учёные выдвинули версию о том, что из-за повышения температуры в Арктике и прогрева зоны вечной мерзлоты на дне (которая прежде сдерживала метан), этот газ начал вырываться сквозь дно океана в его воды, а затем в атмосферу [2].

Специалисты из Кембриджа и университета Эразма Роттердамского построили компьютерную модель RAGE09, которая оценила данные запасы в 50 млрд т метана под дном океана. Далее исследователи, предположив, что температура в Арктике будет расти с той же скоростью, что и в последнее десятилетие, пришли к выводу, что весь этот запас газа окажется в атмосфере Земли в период с 2015 по 2025 год [13]. Это может произойти в связи с таянием слоя вечной мерзлоты.

В ноябре 2009 года РИА Новости сообщило о новой угрозе территории России, связанной с природными процессами в Арктической зоне.

Скорость эрозии берегов на арктическом побережье России значительно выросла из-за таяния вечной мерзлоты, и сейчас ежегодно исчезает около 30 км<sup>2</sup> российской территории.

Процесс таяния мерзлоты из-за потепления климата может иметь не только экономические последствия, но и геополитические – речь, в частности, идёт о потере территории России [15].

Современный этап глобального потепления климата начался в конце 1970-х годов. На это указывают данные наблюдений за приповерхностной температурой воздуха и температурой воды на поверхности океана, собранные в нескольких климатических центрах (CRU, Hadley Centre, NASA GISS и др.).

Для личного состава требуется специальная утеплённая одежда и обмундирование, в том числе с подогревом.

Анализ данных показывает, что минимальные температуры воздуха близки к минус 60 °С и даже могут быть ниже неё и очень велики скорости ветра. Сочетание столь низких температур с большими скоростями ветра крайне отрицательно сказывается на самочувствии людей и их работоспособности и затрудняет работу авиационной и обслуживающей техники. Поэтому необходимо применять специальные сорта смазочных материалов и топлива. Даже температуры ниже -30 °С требуют уменьшения продолжительности нахождения личного состава на открытом воздухе до 2 часов, а при несении часовыми караульной службы – до 1 часа [5]. Сильные порывы ветра в сочетании с большими снеговыми нагрузками могут привести к разрушению различных сооружений, в том числе высотных (радио- и телемачты) [11].

Обобщение данных наблюдений за приповерхностной температурой воздуха показывает наличие 2 периодов повышения полушарной и глобальной приповерхностной температуры воздуха: с 1910 по 1940-е годы и с 1970-х годов. В промежутке между этими периодами температура в целом понижалась [12]. Сравнение изменений в разных широтных зонах Северного полушария показывает усиление потеплений в высоких широтах.

Глобальный анализ температуры воды на поверхности океана с 1860 по 2000 год также показывает 2 периода её роста, разделённые понижением.

Кроме того, выделяется ускоренное повышение глобальной приповерхностной температуры воздуха с 1992 по 2005 год и последующее её понижение, приостановленное повышением приповерхностной температуры воздуха в 2010 году.

Потепление в морской Арктике развивалось неравномерно и, в основном, с середины 1990-х годов. Предшествовавшие относительно тёплые летние сезоны отмечались в 1960-е годы.

Сокращение площади морского льда является наиболее обсуждаемым проявлением современного потепления в Арктике. Согласно [3], абсолютный минимум площади, занятой морским льдом, пришёлся на сентябрь 2012 года. Подобного сокращения площади льдов не наблюдалось никогда ранее. Минимальное значение составило 3,37 млн км<sup>2</sup> 22–25 сентября 2012 года.

Толщина льда является наиболее трудным для массовых измерений параметром морского ледяного покрова. Методы измерения пока развиваются и совершенствуются. Измерения ведутся с летательных аппаратов, подводных судов и заякоренных подлёдных установок, но полной картины пока нет.

По данным подводных лодок в Арктическом бассейне найдено уменьшение средней по бассейну толщины льда на 42 % к середине 1990-х годов относительно среднего значения за 1958–1977 годы.

После 1987 года отмечено сокращение доли многолетних льдов в 2–3 раза и уменьшение всей их толщины в Арктическом бассейне к 2006 году на 23 %. Спутниковые оценки показали, что осенью объём льда уменьшился на 4292 км<sup>3</sup>, а зимой – на 1479 км<sup>3</sup> [3].

Причина резкого сокращения количества арктических льдов в конце летнего периода связана с потеплением климата. С развитием потепления произошла перестройка циркуляционной системы с формированием дипольной структуры.

При сравнении потепления в Арктике с глобальным потеплением или потеплением в Северном полушарии отмечают его максимальное развитие в Арктике. Этот феномен назван Арктическим усилением [3].

В целом, при всей резкой изменчивости климата однозначного ответа нет: непонятно, в каком направлении это изменение климата произойдет.

Человечество должно быть готово к возможным двум противоположным направлениям изменения климата.

### *Список литературы*

1. Акселевич В. И. Порядок разработки прогнозов погоды и моделирования мезоэнодностей с использованием современных информационных технологий // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 40. С. 104–112.
2. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Российской Федерации / под ред. С. К. Шойгу. М.: Феория, 2011. 720 с.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и их последствиях на территории РФ. М., 2014. С. 206–277.

4. Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. 294 с.
5. Исаев А. А. Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001. С. 16–262.
6. Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П. Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. СПб.: Кириллица, 2015. 216 с.
7. Мазуров Г. И., Акселевич В. И., Дроздов С. А. Если растают льды Северного Ледовитого океана // Метеоспектр. 2012. № 3. С. 108–112.
8. Мазуров Г. И., Нестерук В. Н. Метеорологические условия и полёты вертолётот. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 254 с.
9. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учётом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГГМУ, 2011. 254 с.
10. Социально-экономические и экологические основы безопасности Северных регионов России / под общ. ред. М. Б. Глотова, Ю. Л. Матвеева. СПб.: Лема, 2012. С. 3–193.
11. Хандожко Л. А. Экономическая метеорология. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 491 с.
12. Энциклопедия климатических ресурсов России / под. ред. Н. В. Кобышевой, К. Ш. Хайруллина. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 319 с.
13. Наша планета [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.planeta.moy.su/blog/arkticheskaja\\_quot\\_metanovaja\\_bomba\\_quot\\_razrushit\\_mir/2013-08-15-59566](http://www.planeta.moy.su/blog/arkticheskaja_quot_metanovaja_bomba_quot_razrushit_mir/2013-08-15-59566) (дата доступа: 25.03.17).
14. Новости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.infoniac.ru/news/V-Kanade-i-SShA-proshlo-ledyanoe-cunami.html> (дата доступа: 19.04.17).
15. Информационное агентство [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.trend.az/world/russia/1584969.html> (дата доступа: 20.04.17).

*Статья поступила в редакцию 15.05.2017; принята к публикации 25.05.2017*

#### **Библиографическое описание статьи**

*Акселевич В. И., Мазуров Г. И., Хайруллин К. Ш.* Гидрометеорологические опасности Арктики и методика их мониторинга // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 29–37. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-29-37.

**Vitaliy I. Akselevich,**  
*Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Leading Researcher,  
Voeikov Main Geophysical Observatory  
(7 Karbysheva st., Saint Petersburg, 194021, Russia),  
e-mail: vaksster@gmail.com*

**Gennadiy I. Mazurov,**  
*Doctor of Geography, Professor, Leading Researcher,  
Voeikov Main Geophysical Observatory  
(7 Karbysheva st., Saint Petersburg, 194021, Russia),  
e-mail: nanmaz@rambler.ru*

**Kamil Sh. Khairullin,**  
*Candidate of Geography, Leading Researcher,  
Voeikov Award Laureate in Climatology,  
Voeikov Main Geophysical Observatory  
(7 Karbysheva st., Saint Petersburg, 194021, Russia),  
e-mail: khairullink@mail.ru*

### **Hydrometeorological Hazards of the Arctic and Methodology for their Monitoring**

The article is devoted to the description of natural hazards and peculiarities of work in the Arctic zone. The method of their monitoring is considered. New dangerous phenomena are described, such as the ice tsunamis, the rise of methane during the thawing of permafrost, the rise in the level of the world's oceans, the increase in the rate of erosion of the shores of the Arctic Ocean. The question of global warming and cooling is being discussed.

**Ключевые слова:** monitoring, Arctic zone, temperature change, ice tsunamis, methane, reduction of ice area, rising sea level

### **References**

1. Akselevich V. I. Poryadok razrabotki prognozov pogody i modelirovaniya mezone-odnorodnostei s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii // Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. 2015. № 40. S. 104–112.
2. Atlas prirodnykh i tekhnogennykh opasnostei i riskov chrezvychainykh situatsii Rossiiskoi Federatsii / pod red. S. K. Shoigu. M.: Feoriya, 2011. 720 s.
3. Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmenenii klimata i ikh posledstviyakh na territorii RF. M., 2014. S. 206–277.
4. Dmitriev V. V., Frumin G. T. Ekologicheskoe normirovanie i ustoichivost' prirodnykh sistem. SPb.: Nauka, 2004. 294 s.
5. Isaev A. A. Ekologicheskaya klimatologiya. M.: Nauchnyi mir, 2001. S. 16–262.
6. Kobysheva N. V., Akent'eva E. M., Galyuk L. P. Klimaticheskie riski i adaptatsiya k izmeneniyam i izmenchivosti klimata v tekhnicheskoi sfere. SPb.: Kirillitsa, 2015. 216 s.
7. Mazurov G. I., Akselevich V. I., Drozdov S. A. Esli rastayut l'dy Severnogo Ledovitogo okeana // Meteospektr. 2012. № 3. S. 108–112.
8. Mazurov G. I., Nesteruk V. N. Meteorologicheskie usloviya i polety vertoletov. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 254 s.
9. Morozov V. N. Matematicheskoe modelirovanie atmosferno-elektricheskikh protsessov s uchetom vliyaniya aerazol'nykh chastits i radioaktivnykh veshchestv. SPb.: RGGMU, 2011. 254 s.
10. Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie osnovy bezopasnosti Severnykh regionov Rossii / pod obshch. red. M. B. Glotova, Yu. L. Matveeva. SPb.: Lema, 2012. S. 3–193.

11. Khandozhko L. A. Ekonomicheskaya meteorologiya. SPb.: Gidrometeoizdat, 2005. 491 s.
12. Entsiklopediya klimaticheskikh resursov Rossii / pod. red. N. V. Kobyshevoi, K. Sh. Khairullina. SPb.: Gidrometeoizdat, 2005. 319 s.
13. Nasha planeta [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: [http://www.planeta.moy.su/blog/arkticheskaja\\_quot\\_metanovaja\\_bomba\\_quot\\_razrushit\\_mir/2013-08-15-59566](http://www.planeta.moy.su/blog/arkticheskaja_quot_metanovaja_bomba_quot_razrushit_mir/2013-08-15-59566) (data dostupa: 25.03.17).
14. Novosti [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.infoniac.ru/news/V-Kanade-i-SShA-proshlo-ledyanoe-cunami.html> (data dostupa: 19.04.17).
15. Informatsionnoe agentstvo [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.trend.az/world/russia/1584969.html> (data dostupa: 20.04.17).

*Received: May 05, 2017; accepted for publication May 25, 2017*

#### **Reference to article**

*Akselevich V. I., Mazurov G. I., Khairullin K. Sh.* Hydrometeorological Hazards of the Arctic and Methodology for their Monitoring // Scholarly Notes of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. PP. 29–37. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-29-37.

УДК 621.88.002.72

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-38-44

*Сергей Яковлевич Березин,  
доктор технических наук, профессор,  
Забайкальский государственный университет  
(672039, Россия г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),  
e-mail: Berlog\_berezin2011@mail.ru*

### **Параметрический анализ структуры мехатронного привода заворачивающих автоматов**

В статье обоснована необходимость создания сборочных машин с развитой информационной системой. Представлена методика обоснования структуры привода резьбовозаворачивающей электромеханической машины на основе решения исходной теоретической модели состояния её технологической системы. Методика обеспечивает возможность построения высокоточных систем управления процессом сборки резьбовых соединений с максимальным контролем его параметров и условий реализации.

**Ключевые слова:** сборка, заворачивание, автоматическое управление, резьбовые соединения, винт, шпилька, мехатроника, привод, датчик, обратная связь, подача, шаговый двигатель, сборочная головка

Разнообразие резьбосборочного оборудования значительно усложняет создание автоматизированных машин и требует системного подхода к анализу рабочих процессов, происходящих в их технологических системах. Оснащение машин развитыми системами чувствления и многоконтурного управления повышает качество операций и снижает их бракоопасность. Отсутствие методик систематизации элементов сборочных машин и методов их структурных описаний приводит к высоким затратам на переоснащение производства, снижает показатели гибкости и возможности создания машин агрегатно-модульного типа.

Технологическая система автоматической заворачивающей машины должна обеспечить все необходимые условия гарантированного сопряжения собираемых деталей в её координатной системе. Кроме того, её структура должна строиться не только с учётом конструктивно-технологических параметров операции, но и на основе анализа всех переходов её выполнения, которые можно свести к следующему перечню:

- точное позиционирование рабочего стола для совмещения осей собираемых деталей;
- автоматическая подача крепёжной детали в заворачивающую головку;
- осевое перемещение детали до совмещения с кромкой отверстия;
- совокупность движений для совмещения ниток резьбы гнезда и крепёжной детали в случае посадки в резьбовое гнездо;
- в случае посадки в гладкое отверстие или в отверстие листового материала необходимо обеспечить надёжное удержание крепёжной детали для начального этапа резьбоформирования;
- выполнение перехода окончательного заворачивания с необходимой затяжкой в конце;
- освобождение крепёжной детали и возврат заворачивающих устройств в исходное положение.

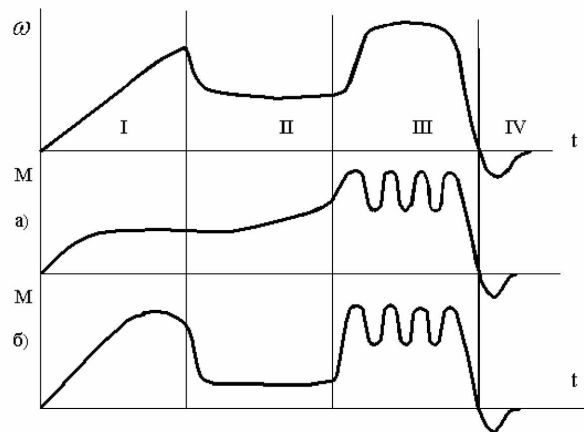
Рассмотрим характер изменения скорости и моментов завинчивания при разных условиях (рис. 1).

При любом сборочном процессе можно выделить четыре основных перехода, включая наживление, завинчивание, затяжку и освобождение головной части крепёжного элемента. Каждый из переходов имеет определённый характер изменения угловой скорости  $\omega$  и крутящего момента  $M$ .

Понятно, что при такой сложной картине изменения указанных параметров возникает задача управления ходом завинчивающего процесса.

Рассмотрим структуру приводов главного движения и осевой подачи без учёта приводов позиционирования рабочего стола с приспособлением, а также манипуляционных устройств подачи крепёжной детали в завинчивающую головку.

Для решения поставленной задачи наилучшим образом подходят мехатронные приводы с шаговыми электродвигателями, имеющие минимум механических передач и электронное управление.



**Рис. 1.** Спектры изменения скорости завинчивания  $\omega$  и момента  $M$  при редкоударной затяжке на III переходе: а) при завинчивании винта в гладкое отверстие; б) при завинчивании самонарезающего винта в лист

**Fig. 1.** Spectra of the velocity change of the column  $W$  and the moment  $M$  when low speed tightening at the third transition: a) when screwing the screw into a smooth hole; b) when screwing self-tapping screws into sheet

Работа таких устройств требует разработки определённого алгоритма управления ходом процесса сборки и соответствующей информационной структуры системы, а также выполнения ряда условий, вытекающих из установления функциональных взаимосвязей между управляющими и управляемыми параметрами [1].

Для анализа хода сборочного процесса установим координатные оси технологической системы:  $Z$  – центральная ось машины (ось шпинделя);  $Y$  – поперечная или радиальная ось.

Ход завинчивающего процесса, поведение крепёжной детали и ведущего наконечника можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J\dot{\omega} = M_g - K_m P \dot{\omega}; \\ m\ddot{Y} = P_u - J_n Y; \\ m\ddot{Z} = (H - Z)c - kP \cdot Z, \end{cases} \quad (1)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции приводных элементов шпиндельной части;

$\dot{\omega}$  – угловая скорость вращения шпинделя;

$M_g$  – крутящий момент на валу электродвигателя главного движения;  
 $K_m$  – коэффициент пропорциональности;  
 $P$  – шаг резьбы;  
 $m$  – масса винта и приводных частей завинчивающей головки;  
 $Y, Z$  – поперечная и продольная координаты соответственно;  
 $P_u$  – изгибающее усилие, возникающее в начальный момент наживления;  
 $J_n$  – жёсткость центральной части завинчивающей головки в радиальном направлении;  
 $H$  – величина сжатия пружины наживления в завинчивающей головке;  
 $C$  – жёсткость пружины наживления;  
 $kP$  – обобщённая сила сопротивления осевому перемещению винта;  
 $k$  – коэффициент пропорциональности.

Приводной момент главного электродвигателя связан со следующими параметрами

$$M_g = K_n \frac{J_p \cdot f \cdot \hat{I}}{p_1}, \quad (2)$$

где  $K_n$  – коэффициент пропорциональности,  $\left[ \frac{\text{рад}}{A \cdot c} \right]$ ;

$J_p$  – момент инерции ротора,  $\left[ \frac{H \cdot \text{м} \cdot c^2}{\text{рад}} \right]$ ;

$f$  – частота импульсов тока;

$\hat{I}$  – амплитудное значение импульса, [A];

$p_1$  – число полюсов двигателя.

Приняв частоту вращения ротора пропорциональной частоте следования импульсов  $\omega = K_K \cdot f$ , получим

$$M_g = \frac{K_n}{K_K} \cdot \frac{J_p \cdot \omega \cdot \hat{I}}{p_1},$$

где  $K_K$  – коэффициент с размерностью [рад].

Перепишем первое уравнение системы (1) в виде

$$J\dot{\omega} + K_M P \dot{\omega} = \frac{K_n}{K_K} \cdot \frac{J_p \cdot \hat{I}}{p_1} \cdot \omega$$

и приведём его к следующей форме:

$$\frac{d\omega}{dt} = a\omega, \quad (3)$$

где  $a$  – величина, равная  $a = \frac{K_n}{K_K} \cdot \frac{J_p \cdot \hat{I}}{p_1(J + K_n P)}$ .

Решение уравнения (3) будет представлено в виде

$$t_H \frac{1}{a} \ln |\omega| + c,$$

где  $t_H$  – время, необходимое для внедрения заходного витка;

$c$  – постоянная, связанная с начальными условиями  $t_H = 0$ ;  $\ln |\omega| = 1$ . Тогда  $c = -\frac{1}{a}$ , и, следовательно,  $t_H = \frac{1}{a} \ln |\omega| - \frac{1}{a} = \frac{1}{a} (\ln |\omega| = 1)$ .

Расчётное время внедрения заходного витка равно

$$t_{PH} = \frac{(d - d_0) \cdot 2000}{2 \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \psi \cdot \omega \cdot d}, \quad (4)$$



где  $d, d_0$  – наружный диаметр резьбы винта и диаметр отверстия, соответственно;  
 $\varphi$  – угол фаски на торце стержня винта;  
 $\psi$  – угол подъёма резьбы.

Воспользовавшись коэффициентом  $K_K$ , определим необходимую частоту следования импульсов, а на основании зависимости (4) получим значение амплитуды тока в импульсе

$$\begin{cases} f = \frac{1}{K_K} e^{at_H+1}; \\ \hat{I} = \frac{(\ln w - 1) \cdot K_K \cdot P_1(J + K_M P)}{t_p \cdot K_{pH} \cdot J_p}. \end{cases} \quad (5)$$

Энергетические параметры привода подачи можно рассчитывать, решив два оставшихся уравнения системы (1). Однако, предварительно необходимо рассмотреть электромеханическую схему завинчивающей головки и её рабочие координаты, представленные на рис. 2а.

Главное движение осуществляет электродвигатель ШД<sub>1</sub>, а движение подач – ШД<sub>2</sub>. Датчики Д<sub>1</sub> и Д'<sub>1</sub> контролируют значение тока в импульсах, а датчики Д<sub>2</sub> и Д'<sub>2</sub> – частоту следования импульсов. Информацию с датчиков получает и обрабатывает устройство управления УУ на базе АЦП L-CARD и компьютера. Устройство УУ содержит также блок питания с распределителями импульсов для работы электродвигателей. Исполнительные двигатели ИД (ШД<sub>1</sub> и ШД<sub>2</sub>) приводят в движение объекты управления (ОУ), в качестве которых выступают ходовой винт и шпиндель с завинчивающей головкой. Датчики Д<sub>3</sub> и Д'<sub>3</sub> контролируют частоты вращения двигателей ШД<sub>1</sub> и ШД<sub>2</sub>. Движение подач включается электромагнитной муфтой М<sub>2</sub> и вращение передаётся ходовой шарико-винтовой передаче. Значение осевой силы контролирует датчик Д<sub>5</sub>, а крутящий момент – Д<sub>4</sub>.

При этом завинчивающий наконечник сопрягается с головкой предварительно установленного винта, происходит сжатие пружины на величину  $H$ , создание осевого усилия  $P_0$ , после чего включается электродвигатель ШД<sub>1</sub> и производится завинчивание на величину  $l_3$  с окружной скоростью, изменяющейся по закону, который необходимо установить.

Для этого, на основании решения второго уравнения системы (1) определим значение времени допустимого смещения винта по координате ОУ

$$t_Y = \left( \frac{\sqrt{J_n}}{m} \right)^{-1} \cdot \arccos \left( 1 - \frac{2L \cdot \operatorname{tg}[\gamma] \cdot J_n}{P_0 \cdot d_0} \right), \quad (6)$$

где  $L$  – длина винта и подвески завинчивающей головки;

$[\gamma]$  – допустимый угол переноса винта;

$P_0$  – требуемая величина осевого усилия, необходимого для обеспечения поперечной устойчивости винта.

Приравняв выражения (4) и (6), определим значения требуемой осевой силы подачи

$$P_0 \geq \frac{2L \cdot \operatorname{tg}[\gamma] \cdot J_n}{\left[ 1 - \cos \left( \sqrt{\frac{J_n}{m}} \cdot t_p \right) \right]} \cdot d_0. \quad (7)$$

Аналогичным образом решаем третье уравнение системы (1) и получаем значение нормированного времени внедрения заходного витка по координате ОZ

$$t_Z = \left( \sqrt{\frac{c + kP}{m}} \right)^{-1} \arccos \left[ 1 - \frac{(d - d_0) \cdot (c + kP)}{2 \operatorname{tg} \varphi \cdot H \cdot c} \right]. \quad (8)$$

Если длина заходного витка винта в соответствии с величиной припуска равна

$l_3 = \frac{d - d_0}{2tg\varphi}$ , то число оборотов для его внедрения  $z_0 = \frac{l_3}{P_B}$ , где  $P_B$  – шаг ходового винта осевой подачи, показанного на рис. 2а справа от муфты  $M_1$ .

Следовательно, окружная скорость вращения ходового винта будет равна

$$\omega_z = \frac{2\pi \cdot l_3}{P_B \cdot t_Z},$$

а частота следования импульсов шагового двигателя осевой подачи будет соответствовать значению

$$f_Z = \frac{\pi(d - d_0)}{K_K \cdot t_Z \cdot P_B \cdot tg\varphi}.$$

Приняв время наживления винта  $t_H$  к выражению (8), получим необходимую окружную скорость привода главного движения в конце наживления

$$\omega = e^{at_z+1}. \quad (9)$$

Зная реактивный момент сопротивления вращению ходового винта, можно определить амплитуду импульсов шагового электродвигателя подачи аналогично приводу главного движения.

В дальнейшем реализация действий мехатронной головки происходит по схеме, показанной на рис. 2б. После окончания времени  $t_Z$  сборка подходит к этапу II, из рис. 1. При этом значение скорости главного движения меняется в соответствии с программой, а скорость подачи должна соответствовать соотношению шагов резьбы крепёжного элемента и ходового винта. Но на втором и последующих этапах осевой силы наживления  $P_0$  уже не требуется, и скорость подачи должна соответствовать минимальному значению показаний датчика  $D_5$ .

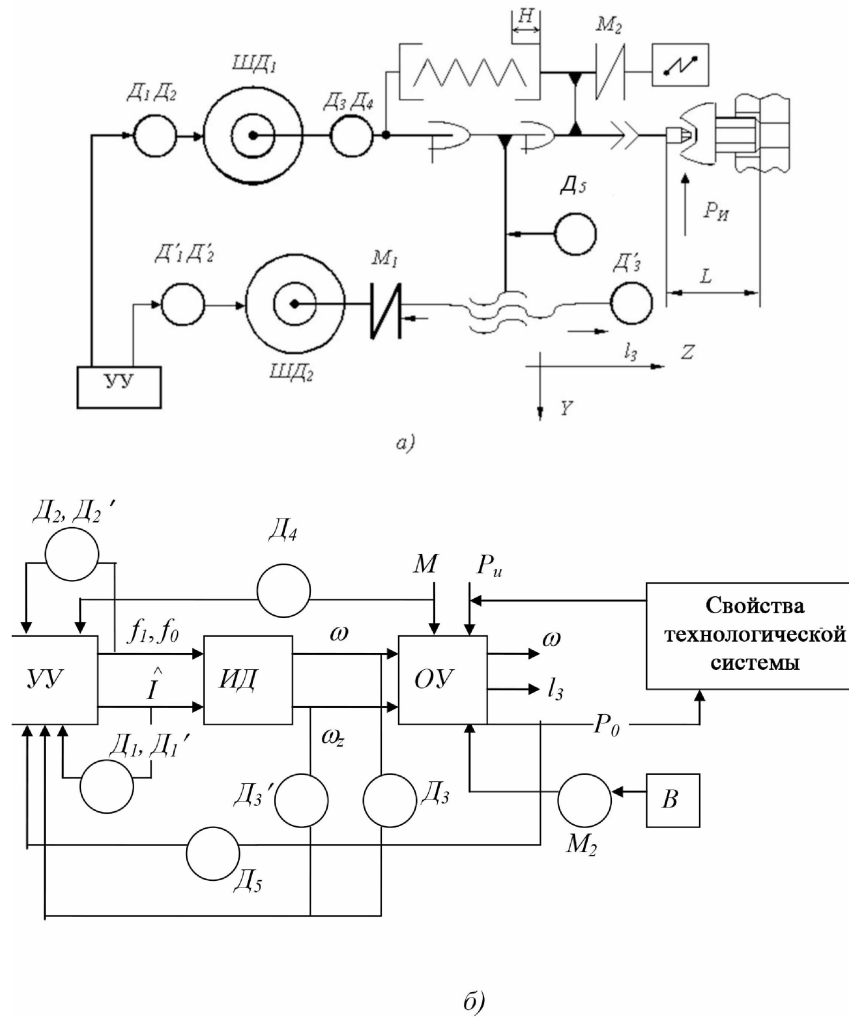
В начале III этапа осевая подача выключается, а шаговый электродвигатель ШД<sub>1</sub> переходит в режим затяжки. Создаётся необходимый крутящий момент, включается электромагнитная муфта  $M_2$  и редкоударный механизм  $B$ . В конце затяжки они выключаются, двигатель ШД<sub>1</sub> останавливается, а ШД<sub>2</sub> реверсируется, и головка освобождает винт. Все устройства возвращаются в исходное положение.

Реализация работы агрегата, представленного на рис. 2, будет возможна на основе разработки подробной идентификации параметров управления. Для этого рассмотрим только цель главного движения завинчивающей машины с электродвигателем ШД<sub>1</sub>. Его работа основана на информации о ходе процесса завинчивания, которая поступает из трёх источников:

- от параметрических датчиков;
- от отдельного блока хранения и ввода расчётных заданных, данных в программе компьютера;
- от компьютерной модели процесса, представляющего картину формирования параметров сборки по её этапам (на примере рис. 1).

В блок ввода данных заносятся константы электродвигателя и параметров механических цепей привода. Вал электродвигателя и шпинделя соответственно связан с датчиком угла поворота, сигнал которого после дифференцирования преобразуется в частоту вращения  $\omega$  и далее в ускорение  $\dot{\omega}$ .

В модели процесса заложены различные варианты таблично-графических представлений о распределении частоты вращения по длине завинчивания ( $Z$ ). Информация с датчиков перерабатывается в соответствии с ходом расчётов по формулам (1)–(5). Данные о поднастройке частоты  $\pm\Delta f$  и амплитуды импульсов тока  $[\pm\Delta I = F(\pm\Delta M)]$  поступают в устройство управления.



**Рис. 2.** Структура мехатронного привода:  
 а) электромеханическая схема; б) структурная схема  
**Fig. 2.** The structure of the mechatronic drive:  
 а) electromechanical circuit; б) structural scheme

Так учитывается реакция системы на внешние возмущения (по крутящему моменту  $M$ ) и по электрическим параметрам.

Представленный подход к формированию структуры управляющего процесса, основанный на детальном представлении об его параметрах и ходе протекания, даёт возможность не только создавать системы, основанные на традиционных принципах теории автоматического управления, но и позволяет разрабатывать более совершенные и быстродействующие системы, например, на основе нейрорегуляторов.

#### Список литературы

1. Березин С. Я. Основы кибернетики и управление в биомедицинских системах: учеб. пособие. Изд. 2-е, дополн. и перераб. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2015. 270 с.
2. Berezin S. Y., Chumakov R. E. Structured system analysis for assembly automation // Journal of Mechanical Engineering. 2006. Vol. 57, No. 3. P. 180–188.

Статья поступила в редакцию 05.05.2017; принята к публикации 15.05.2017

**Библиографическое описание статьи**

Березин С. Я. Параметрический анализ структуры мехатронного привода завинчивающих автоматов // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 38–44. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-38-44.

*Sergey Ya. Berezin,  
Doctor of Engineering Science, Professor,  
Transbaikal State University  
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),  
e-mail: Berlog\_berezin2011@mail.ru*

**Parametrical Analysis of Mechatronics Drive Structure of the Screwing Automatic Devices**

In this article necessity of assembly machines with the developed information system is proved. The technique of a substantiation of structure of screwing electromechanical machines on the basis of the solution of initial theoretical model of a condition of its technological system is presented. The technique provides an opportunity of construction of precision control systems with process of assembly of carving connections with the maximal control of its parameters and conditions for realization.

**Keywords:** assembly, screwing, automation control, screw joints, fastener, stud, mechatronics, driver, sensor, feedback, axial feed, stepper motor, assembly head

**References**

1. Berezin S. Ja. Osnovy kibernetiki i upravlenie v biomedicinskih sistemah: ucheb. posobie. Izd. 2-e, dopoln. i pererab. Staryj Oskol: Izd-vo TNT, 2015. 270 s.
2. Berezin S. Y., Chumakov R. E. Structured system analysis for assembly automation // Journal of Mechanical Engineering. 2006. Vol. 57, No. 3. P. 180–188.

*Received: May 05, 2017; accepted for publication May 15, 2017*

**Reference to article**

*Berezin S. Ya. Parametrical Analysis of Mechatronics Drive Structure of the Screwing Automatic Devices // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. PP. 38–44. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-38-44.*

УДК 622.271.1:621.879.443

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-45-51

*Михаил Витальевич Костромин,  
доктор технических наук, профессор,  
Забайкальский государственный университет  
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александрово-Заводская, 30),  
e-mail: kostrmv@yandex.ru*

### **Новые тенденции в области интенсификации массообмена при кучном выщелачивании золота**

Рассмотрены новые подходы в вопросе интенсификации массообмена при кучном выщелачивании золота – периодический режим орошения, уменьшение крупности дробления руды, активация химических реакций цианирования (накислороживание, повышение концентрации цианида натрия, повышение температуры растворов, использование ультрафиолетового излучения, электролизной спецподготовки растворов и др.). Сделан анализ теоретических исследований механизма процесса выщелачивания золота. Выявлены недостатки некоторых теоретических представлений процесса выщелачивания. Установлена необходимость проведения дальнейших теоретических исследований в этой области.

**Ключевые слова:** массообмен, кучное выщелачивание, интенсификация, диффузия, кинетика, растворы, золото

С помощью различных растворителей возможно эффективно переводить в подвижное состояние многие полезные ископаемые. Такой переход происходит в результате процессов растворения и выщелачивания, которые различаются по механизму взаимодействия растворителя и растворяемого вещества.

Механизм процесса выщелачивания определяется структурой и составом растворяемого минерала, характером химической связи в его кристаллической решётке, комплексом физико-химических свойств растворителя.

Для процесса в кинетической области характерны независимость скорости растворения от скорости движения растворителя, малые абсолютные значения коэффициента скорости растворения, увеличение коэффициента скорости растворения на порядок с повышением температуры растворителя на 10 °С. Диффузионно-кинетический процесс характеризуется сравнительными коэффициентами скорости межфазового и диффузионного растворения.

Растворение большинства солей идёт по диффузионной кинетике, т. е. определяется скоростью диффузионных процессов. При наличии разных концентраций в жидкости возникает молекулярная диффузия – диффузионный поток, пропорциональный градиенту концентраций. Частицы вещества, растворённого в жидкости, увлекаются последней и переносятся вместе с ней.

Совокупность этих двух процессов представляет собой конвективную диффузию вещества в жидкости. Полный поток вещества при конвективной диффузии через 1 см<sup>2</sup> поверхности будет

$$J = uC - DgradC,$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;

$C$  – концентрация смеси;

$u$  – скорость движения смеси.

В процессе КВ золота сталкиваются с физическим свойством горных пород – пропускать через себя жидкости и газы, которое характеризуется коэффициентом проницаемости  $Kt$  (дарси) и коэффициентом фильтрации  $Kф$  (м/сут, см/с).

$$Kt = Kфp_{ж} - Jp,$$

где  $p_{ж}$  – плотность жидкости (кг/см<sup>3</sup>);

$Jp$  – вязкость жидкости.

Таким образом, когда процесс выщелачивания золота контролируется внутридиффузионным торможением, казалось бы, в основу основ исследований необходимо ставить проницаемость пород и физико-химические свойства жидкостей.

Для решения общего уравнения конвективной диффузии в качестве граничных условий обычно принимается концентрация раствора или её производная на границе общей диффузии. Это уравнение применимо как для условий движения свободной жидкости, так и для условий движения жидкости в пористой среде. Разница лишь в том, что во втором случае необходимо использовать эффективный коэффициент диффузии внутри массы пористого материала, который определяется средним диаметром пор, их числом на единицу площади извилистости.

В приложении к большинству диффузионных процессов извлечения из пористых сред эта задача чрезвычайно сложна. До настоящего времени нет общепризнанной законченной теории извлечения компонентов из слоя пористых тел и во многих случаях невозможно научно обосновать выбор селективного растворителя и условий растворения. Теоретические представления в этой области получают всё большее развитие. В этом большая заслуга Н. Н. Веригина, Г. А. Аксельруда, М. А. Альтшулера, Е. М. Семенишина и других исследователей [1–4; 9; 10].

Механизм процесса выщелачивания определяется структурой и составом растворимого минерала, характером химической связи в его кристаллической решетке, комплексом физико-химических свойств растворителя.

Диффузионный процесс характеризуется зависимостью коэффициента скорости растворения от скорости и направления движения растворителя, зависимостью коэффициента скорости растворения от коэффициента диффузии и вязкости, сравнительно невысокими значениями температурного коэффициента. По первому закону Фика

$$J = DgradC. \tag{1}$$

По А. Н. Щукареву плотность потока вещества с поверхности растворения пропорциональна концентрационному потоку насыщения раствора

$$J = K(Cs - C_1), \tag{2}$$

где  $Cs$  – концентрация насыщения;

$C_1$  – концентрация раствора;  $K$  – коэффициент скорости диффузии.

По Нернсту градиент концентрации определяется величиной

$$gradC = (C_1 - C_s)/\delta, \tag{3}$$

где  $C_1$  – концентрация в основной массе раствора.

Сравнивая (1) и (2), получаем

$$K = D/\delta, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина неподвижного слоя жидкости, которая изменчива и, как доказано позднее, несостоятельна. Введено понятие пограничного слоя жидкости  $\delta_0$ , в котором скорость движения жидкости изменяется от 0 до  $w$ , а скорость в слое жидкости, прилегающей к поверхности растворяемой частицы, определили как

$$v = wy/\delta_0. \quad (5)$$

Г. А. Аксельрудом определены решения для  $\delta_0$  при относительно больших скоростях потока в критериальном виде, когда  $Re \geq 1$  [3], предлагаются и более сложные диффузионные критериальные уравнения

$$\delta_0 = l/(Re)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $l$  – характерный размер твёрдого тела.

В случае кучного выщелачивания золота  $Re \leq 0,001$ . По этой причине и в связи с протеканием процесса в промежуточной области химической кинетики от критериальных уравнений массообмена при скоростном КВ золота отказались. Скорость диффузии реагентов в скальных породах оценивается ориентировочно в 1 см/сутки. Следовательно, при кучном выщелачивании золота процесс должен закончиться за 1–5 суток при крупности дробления руды – 10 мм. Фактически при классическом варианте выщелачивания золота процесс может продолжаться более 100 суток.

Увеличивая массообмен за счёт периодического режима орошения, удалось повысить степень выщелачивания золота за 30 суток с 20 до 40 %. Уменьшая крупность дробления руды до 2 мм и повышая массообмен за счёт увеличения концентрации кислорода с 8 мг/л до 39 мг/л, возможно повысить степень выщелачивания золота до 68 % [5–6].

Чтобы выщелачивать золото из дроблённой руды с более высокой степенью и при большей крупности дробления, необходимы другие варианты интенсификации КВ золота. В [5; 6] интенсификацию связывали с активацией химических реакций цианирования золота одновременно во всем объёме штабеля. Это возможно, если процесс перевести в область, контролируемую не только внутридиффузионным торможением, но физико-химическими процессами, например, за счёт их активации кислорода, повышения более, чем на порядок, действующей концентрации цианида натрия.

По достижении высоких скоростей с повышением температуры всё больше оказывают влияние вторичные процессы. Так, например, увеличиваются потери золота в продукционном растворе вследствие сорбции цианида золота на руде; при расчёте скорости выщелачивания золота желательнее прибегать не к общему удельному расходу цианида натрия, а к действующей его концентрации, которая определяется с учётом сорбции части реагента рудой; увеличивается агрессивность рабочих агентов и продуктивных флюидов, снижается активность сложных реакций. Поэтому все физико-химические процессы по достижении высоких скоростей надо оценивать и с положительной, и с отрицательной стороны, находя оптимум на базе экономических расчётов.

На промежуточную область кинетики цианидного выщелачивания золота в случае присутствия серебра в сплаве золота указывает И. Н. Плаксин [7]. Исследования температурной зависимости условной константы скорости при относительно высоких скоростях КВ золота показали, что  $E_{\text{акт}}$  при 15–22 °С равна 60 кДж/моль, при 7–15 °С – 80 кДж/моль, что указывало на промежуточную область кинетики, когда на степень выщелачивания золота влияют разные формы физико-химической активации – из которых в настоящее время исследованы: наислороживание растворов; реагентно-концентрационная; ионно-водородная. Это далеко не полный перечень активации выщелачивания золота из рудного сырья.

В исследованиях Л. Г. Секисова и сотрудников разрабатываются эффективные методы активации выщелачивания золота за счёт использования ультрафиолетового излучения и за счёт электролизной спецподготовки водного раствора [8].

Для описания изменения материального баланса золота при КВ золота прибегают к уравнениям формальной кинетики, учитывающим диффузионное торможение.

Исследуя процессы растворения твёрдых веществ, Г. А. Аксельруд на основании собственного математического анализа получает кинетическое диффузионное уравнение

$$1 - \varphi^2 = t/T_g, \quad (7)$$

когда плотность покрывающего вещества равна плотности растворяющегося вещества, и

$$1 - 3\varphi^2 + 2\varphi^3 = t/T_g, \quad (8)$$

когда плотность покрывающего вещества не равна плотности растворяющегося вещества.

В уравнениях  $\varphi = r_0/R$ , где  $R$  – первоначальный радиус частицы  $r_0$  – размер через время  $t$ ,  $T_g$  – время полного превращения частицы.

Уравнение (7) описывает кинетику извлечения твёрдой фазы из твёрдых тел. На основании уравнений (7) и (8) приведена диаграмма растворимости (рис. 1).

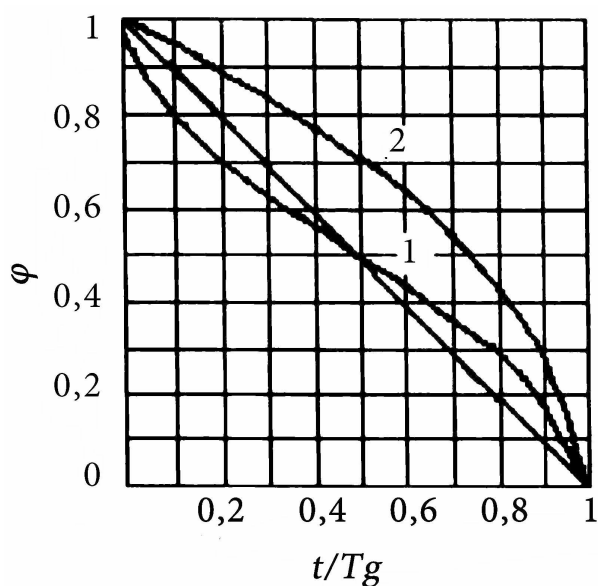


Рис. 1. Кривые кинетики растворения: 1 – по уравнению (7); 2 – по уравнению (8)

Fig. 1. The curves of kinetics of dissolution: 1 – by equation (7); 2 – equation (8)

Ниже приводится пример обработки степени выщелачивания золота  $X$  по уравнению 8 (табл. 1 и рис. 2), из которых видна необходимость в поиске или разработке новых закономерностей для описания скоростного КВ золота.

Для повышения точности описания процессов, характеризующих интенсивное (скоростное) кучное выщелачивание золота, разработано новое эмпирическое уравнение [5]

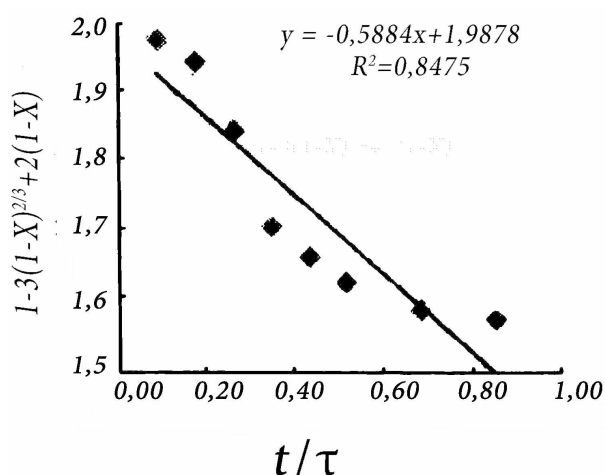
$$X = 1 - \left( \frac{k'}{\lg(t^{0,16} + g)} \right)^{6.667}. \quad (9)$$



Таблица 1

Пример обработки экспериментальных данных по уравнению (8)

$Tg$	$t$ , сутки	Хизвлечение золота (доли единицы)	$1 - X$	$2(1 - x)$	$(-1) \times 2 \times (1 - x)^{2/3}$	$1 + 2(1 - X) - 3(1 - x)^{2/3}$	$t/tg$
12	0	0	1	2.000	-3.000	2.00000	0.00
12	1	0,187	0,813	1,626	-2,613	1,98725	0,08
12	2	0,337	0,663	1,326	-2,281	1,95503	0,17
12	3	0,560	0,44	0,880	-1,735	1,85549	0,25
12	4	0,729	0,271	0,542	-1,256	1,71432	0,33
12	5	0,766	0,234	0,468	-1,139	1,67120	0,42
12	6	0,794	0,206	0,412	-1,046	1,63440	0,50
12	8	0,822	0,178	0,356	-0,949	1,59330	0,67
12	10	0,831	0,169	0,338	-0,917	1,57902	0,83



**Рис. 2.** Пример графической обработки экспериментальных данных по уравнению (8) (в соответствии с уравнением 9 линейной зависимости выражения  $1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X)$  от  $t/\tau$  не наблюдается)

**Fig 2.** An example of a graphical processing of experimental data by equation (8) (in accordance with equation 9 linear dependence of the expression  $1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X)$  from  $t/\tau$  is not observed)

Однако, следует сделать замечание, что в данном случае при выводе эмпирической зависимости приравнены два уравнения, выражающие различные явления. Первое – диффузионный поток кислорода к поверхности золотины, второе – скорость выщелачивания. Это недопустимо с точки зрения математики.

Далее,  $k_1$  условная константа извлечения второго уравнения приравняется (безосновательно) к  $KCO_2D^{1/2}$  – первого уравнения. Если это равенство действительно имеет смысл, его нужно обосновать. В уравнении Гинстлинга параметр  $t$  заменён на  $t^{0.5}$  – тоже без всякого обоснования. Ввод математического оператора  $(1 - x)^{0.15}$  может быть верен только для частичного случая. В целом уравнение, названное «кинетикой кучного выщелачивания золота», а точнее назвать – степенью выщелачивания золота  $X$ , получено на основе умозаключений известных уравнений Ильковича и Белоглазова-Зуньига и др. (три его составляющие  $K^1$ ,  $t$  и  $g$  – имеют одну размерность – сутки), не являются формулой, полученной в результате обработки экспериментальных данных или теоретических обобщений.

Часто для выявления вероятности протекания реакции определяют энергию Гиббса (изменение изобарно-изотермического потенциала) расчётным методом. Термодинамические

данные по выщелачиванию золота очень скудные. В связи с активацией цианидного выщелачивания золота заслуживают внимание величины  $\Delta G_{,297 \text{ } \circ\text{K}}$ , для реакций с участием иона водорода [6].

Таблица 2

Данные  $\Delta G_{,297 \text{ } \circ\text{K}}$ , реакция для реакций цианирования золота в растворе

№ п/п	Реакции цианирования золота	$\Delta G_{,297 \text{ } \circ\text{K}}$ , реация кДж/ Моль
1	$4U + 2HCN = H[Au(CN)_2] + 0.5H_2$	520,65
2	$Au + 2HCN + 1/10_2 = H[Au(CN)_2] + 1/2H_2O$	402,03
3	$Li + 2CN + H_2O + 1/2O_2 = [Au(CN)_2] + 2OH$	-151,35
4	$Au + 2CN + 2H + 1/4O_2 = H[Au(CN)_2] + 1/2H_2O$	-192,37

Согласно расчётам, в данной подборке авторы обосновывают активацию цианидного процесса выщелачивания золота в слабощелочной и нейтральной среде.

Таким образом, в последнее время очевидны новые тенденции в области интенсификации кучного выщелачивания золота – активация физико-химических процессов в промежуточной области кинетики. В ряде случаев это заканчивается положительными результатами. Тем не менее, в результате проведённого анализа, выявляется необходимость дальнейшей разработки теоретических основ механизма процесса выщелачивания золота.

### Список литературы

1. Долгих П. Ф., Остроумова И. Д., Бубнов В. К., Катков Ю. А., Тыныбеков М. И. Математическое моделирование процесса выщелачивания полезных компонентов из кускового рудного материала // Комплексное использование минерального сырья. 1981. № 5. С. 36–38.
2. Шьюмон П. Диффузия в твёрдых телах. М., 1968.
3. Аксельруд Г. А., Альтшулер М. А. Введение в капиллярно-химическую технологию. М., 1983.
4. Стрижко В. С., Медведев А. С. Химические методы обогащения. Термодинамика и кинетика выщелачивания. М.: МИСиС, 1989. 108 с.
5. Рубцов Ю. И. Современные тенденции в переработке золотосодержащих руд и техногенных отходов. Чита: ЧитГУ, 2007. 280 с.
6. Рубцов Ю. И. Теоретические основы скоростного кучного выщелачивания золота. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 7. С. 201–206.
7. Плаксин И. Н. Гидрометаллургия. М.: Наука, 1972. 278 с.
8. Секисов А. Г., Зыков Н. В., Шумилова Л. В. Инновационные технологии в решении проблемы повышения эффективности золотодобычи Забайкалья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 6. С. 240–244.
9. Brewis T. Metal extraction by bacterial oxidation // Mining Mag. 1995. Vol. 47, No 10. P. 197–201.
10. Johnson J. Gold regions heap leach requirements Pokrovskoye project. Draft Golden Associates. Denver. Colorado, 1995.

*Статья поступила в редакцию 05.06.2017; принята к публикации 17.06.2017*

### Библиографическое описание статьи

Костромин М. В. Новые тенденции в области интенсификации массообмена при кучном выщелачивании золота // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 45–51. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-45-51.

*Mikhail V. Kostromin,*  
*Doctor of Engineering Science, Professor,*  
*Transbaikal State University*  
*(672039, Russia, Chita, Aleksandro-Zavodskaya st., 30),*  
*e-mail: kostrmv@yandex.ru*

### **New Trends in the Intensification of Mass Transfer in Heap Leaching of Gold**

New approaches to the issue of intensification of mass exchange under heap leaching of gold are discussed. The periodic irrigation regime, the reduction of ore crushing size, the activation of chemical cyanidation reactions (naciination, increasing the concentration of sodium cyanide, increasing the temperature of solutions, using ultraviolet radiation, electrolytic special preparation of solutions, etc.). The analysis of theoretical studies of the mechanism of the process of gold leaching is made. Deficiencies of some theoretical concepts of the leaching process are revealed.

**Keywords:** mass exchange, heap leaching, intensification, diffusion, kinetics, solutions, gold

### **References**

1. Dolgikh P. F., Ostroumova I. D., Bubnov V. K., Katkov Yu. A., Tynynbekov M. I. Matematicheskoe modelirovanie protsessa vyshchelachivaniya poleznykh komponentov iz kuskovogo rudnogo materiala // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya. 1981. № 5. S. 36–38.
2. Sh'yumon P. Diffuziya v tverdykh telakh. M., 1968.
3. Aksel'rud G. A., Al'tshuler M. A. Vvedenie v kapillyarno-khimicheskuyu tekhnologiyu. M., 1983.
4. Strizhko V. S., Medvedev A. S. Khimicheskie metody obogashcheniya. Termodinamika i kinetika vyshchelachivaniya. M.: MISiS, 1989. 108 s.
5. Rubtsov Yu. I. Sovremennye tendentsii v pererabotke zolotosoderzhashchikh rud i tekhnogennykh otkhodov. Chita: ChitGU, 2007. 280 s.
6. Rubtsov Yu. I. Teoreticheskie osnovy skorostnogo kuchnogo vyshchelachivaniya zolota. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2009. № 7. S. 201–206.
7. Plaksin I. N. Gidrometalurgiya. M.: Nauka, 1972. 278 s.
8. Sekisov A. G., Zikov N. V., Shumilova L. V. Innovatsionnye tekhnologii v reshenii problemy povysheniya effektivnosti zolotodobychi Zabaikal'ya // Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2009. № 6. S. 240–244.
9. Brewis T. Metal extraction by bacterial oxidation // Mining Mag. 1995. Vol. 47, No 10. P. 197–201.
10. Johnson J. Gold regions heap leach requirements Pokrovskoye project. Draft Golden Associates. Denver. Colorado, 1995.

*Received: June 05, 2017; accepted for publication June 17, 2017*

### **Reference to article**

*Kostromin M. V. New Trends in the Intensification of Mass Transfer in Heap Leaching of Gold // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. No. 4. PP. 45–51. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-45-51.*

УДК 537.8

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-52-58

*Сергей Дмитриевич Крылов,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН  
(672014, Россия, г. Чита, ул. Недорезова, 16 а),  
e-mail: lgc255@mail.ru*

### **Использование микроволнового излучения для исследования тонких плёнок жидкости на поверхности металла**

В статье представлены результаты исследования электрических свойств тонких плёнок жидкости на поверхности металла с помощью микроволн. Исследования были выполнены в медном прямоугольном волноводе на частоте излучения 54.5 ГГц. Измерялась мощность микроволнового излучения, проходящего через волновод. На стенках волновода методом конденсации газа в жидкость при его охлаждении осаждались плёнки жидкого кислорода и аргона. Исследования выполнялись при предположении, что появление плёнки жидкости на стенках волновода будет менять величину проходящей мощности, т. е. проходящее микроволновое излучение будет зависеть от свойств плёнки на стенках волновода. Охлаждение осуществлялось с помощью жидкого азота. Обнаружено уменьшение электромагнитных потерь при пропускании микроволнового излучения. Этот эффект можно объяснить появлением высокопроводящей плёнки на границе металл – жидкость. Следовательно, использование микроволн для изучения тонких слоёв жидкости на металлической поверхности может дать необычную и недоступную для других методов информацию.

**Ключевые слова:** микроволновое излучение, электропроводность, тонкие плёнки жидкости, конденсация газа

**Введение.** Свойства вещества в тонком поверхностном слое на границе, отделяющей одно вещество от другого, значительно отличаются от свойств внутри объёма. Представляет научный и практический интерес изучение свойств вещества в тонком поверхностном слое, на границах двух сред [10]. Плёнки проявляют самые разнообразные свойства и в настоящее время широко используются в оптике, медицине, электронике и микроэлектронике, бытовых приборах и т. д. Соответственно широк и многообразен фронт исследований способов получения плёнок [4; 6] и их свойств [2; 3; 7; 11; 12].

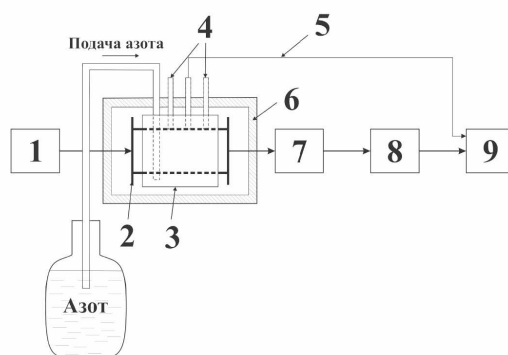
В данной работе предпринята попытка исследовать свойства тонкого слоя жидкости на поверхности металла с помощью микроволн (СВЧ волн). Как известно, микроволновое излучение проникает в проводящие среды на глубину, соответствующую так называемому скин-слою ( $\delta$ ). Толщина скин-слоя определяется электрической проводимостью материала ( $\sigma$ ) и частотой излучения ( $f$ ):  $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\mu\sigma f}}$  [8]. В этой формуле  $\mu$  – магнитная проницаемость материала, для меди равна 1. Предполагается, что в тонком слое жидкости на поверхности металла могут появиться особые электрические свойства [5]. Такие свойства теоретически предсказаны для поверхности льда для квазижидкого слоя толщиной в единицы и десятки нанометров, проводимость которого возростала на шесть порядков, по сравнению с водой [9]. То же для контакта двух диэлектриков с большой разницей значений статической диэлектрической проницаемости [13; 14]. Экспериментально плёнку с проводимостью выше

проводимости меди для осаждения азота и, возможно, кислорода на внутренней поверхности медного резонатора наблюдали в [1], однако это наблюдение не было подтверждено другими способами.

Цель настоящей работы заключалась в измерении прохождения микроволнового излучения через металлический волновод, на внутреннюю поверхность которого осаждали различные жидкости. Для их равномерного осаждения использовали конденсацию газов в жидкое состояние при понижении температуры стенок волновода. Так как электромагнитная волна при распространении в волноводе взаимодействует только с внутренней поверхностью волновода, то появление жидкого слоя на поверхности волновода приводит к появлению поглощения, если проводимость слоя меньше проводимости металла или наоборот. Измеряя мощность проходящего через волновод микроволнового излучения, можно определить относительное изменение проводимости тонкого поверхностного слоя жидкости на металлической поверхности, т.е. получить сведения о необычных свойствах плёнки.

**Описание эксперимента.** Измерения выполнялись в прямоугольном волноводе, на внутренние стенки которого осаждали различные жидкости. Для их равномерного осаждения использовали конденсацию газов в жидкое состояние при понижении температуры волновода. Охлаждение исследуемого волновода осуществлялось с помощью жидкого азота следующим образом. Исследуемый волновод помещался в металлическую ёмкость, в которую по трубке из сосуда Дьюара подавался струйкой жидкий азот. Сама ёмкость вместе с волноводом помещалась в пенопластовый контейнер для термоизоляции. В начальный период волновод охлаждался парами азота, а затем жидкий азот заливал волновод. Температура, которую удавалось достичь, составляла  $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. равнялась температуре кипения жидкого азота. Через охлаждаемый волновод пропускались газы: кислород, температура кипения которого  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ , аргон, температура кипения  $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$ , углекислый газ  $\text{CO}_2$  и водород. Углекислый газ и водород исследовались для того, чтобы сравнить результаты измерений с аргоном и кислородом. Углекислый газ из газообразного состояния при атмосферном давлении переходит в твёрдое, минуя жидкое состояние при температуре  $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для водорода жидкого состояния с помощью охлаждения азотом достичь нельзя. Температура кипения водорода  $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. значительно ниже температуры кипения азота.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.



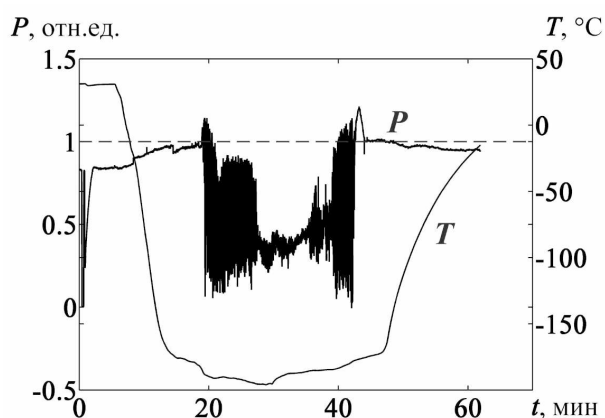
**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – генератор микроволнового излучения Г4-142; 2 – исследуемый волновод; 3 – металлическая ёмкость; 4 – трубки для подвода газа в волновод; 5 – термопара; 6 – пенопластовый контейнер; 7 – вентиль; 8 – детектор; 9 – система сбора информации фирмы “Agilent”

**Fig. 1.** Diagram of the experimental setup: 1 – the microwave radiation generator G4-142; 2 – the studied waveguide; 3 – metal vessel; 4 – pipe for supplying a gas into the waveguide; 5 – thermocouple; 6 – foam container; 7 – valve; 8 – detector; 9 – the system of gathering information of the company “Agilent”

Сигнал от генератора микроволнового излучения Г4–142 подавался на исследуемый участок волновода, а далее через вентиль на детектор и систему сбора информации фирмы “Agilent”. Частота подаваемого сигнала 54.5 ГГц. Размеры исследуемого волновода: длина волновода 124 мм, внутренние размеры 5×3 мм. Волновод изготовлен из меди. Регистрация мощности проходящего микроволнового излучения осуществлялась непрерывно с записью на компьютер. Одновременно с измерением проходящей мощности излучения с помощью термометра регистрировалась температура исследуемого волновода.

**Результаты измерений.** Результаты измерений изменения проходящей мощности микроволнового излучения при заполнении волновода кислородом представлены на рис. 2.

Из рисунка видно, что при пропускании кислорода через волновод первоначально в момент появления жидкого кислорода наблюдалось небольшое увеличение сигнала в пределах 15 %. Это можно объяснить появлением плёнки кислорода на стенках волновода, что ведёт к улучшению прохождения микроволнового излучения через волновод. Далее наблюдались хаотические флуктуации проходящей мощности, связанные с увеличением толщины плёнки кислорода и стоком жидкости в нижнюю часть волновода. Когда в волноводе накопилось много жидкости, флуктуации уменьшились — средняя часть графика. Затем при нагревании наблюдался обратный процесс — увеличение флуктуаций и их исчезновение, когда весь кислород перешёл в газообразное состояние. Такое же поведение сигнала наблюдается с аргоном (рис. 3).



**Рис. 2.** Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения  $P$  (в относительных единицах) при заполнении волновода жидким кислородом: левая ось – значения мощности; правая ось – температура волновода  $T$ ; штриховая горизонтальная линия – уровень мощности, проходящей через волновод без жидкости

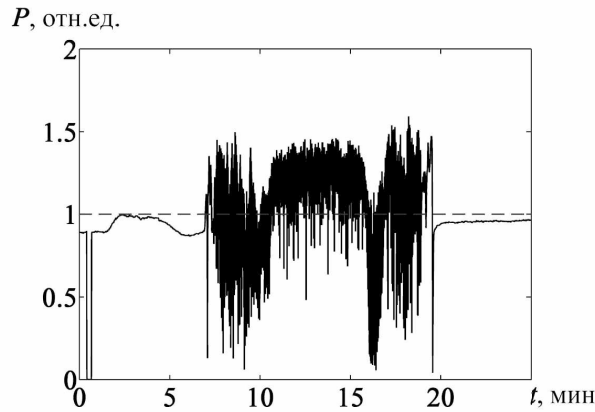
**Fig. 2.** The results of measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation  $P$  (in relative units) when filling the waveguide with liquid oxygen: left axis – values of power; the right axis is the temperature of the waveguide  $T$ ; the dashed horizontal line is the level power passing through the waveguide without fluid

Отличие от первого эксперимента в том, что в момент появления флуктуаций наблюдается более значительное увеличение сигнала приблизительно на 40 процентов.

При выполнении этого же эксперимента с водородом такого поведения сигнала не наблюдается (рис. 4).

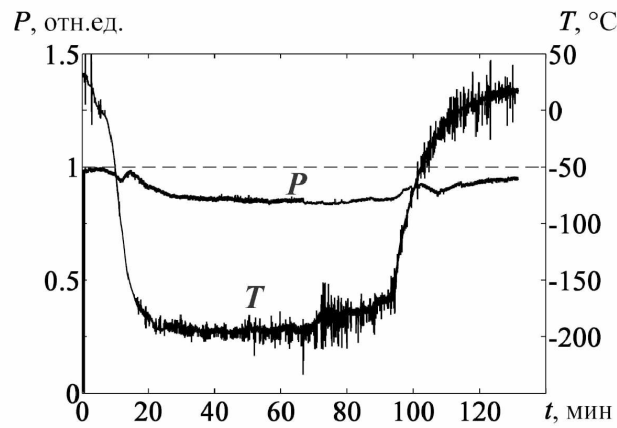
Объясняется это тем, что водород в жидкое состояние не переходит и жидкости на стенках волновода не образуется.

Интересное наблюдение с углекислым газом (рис. 5).



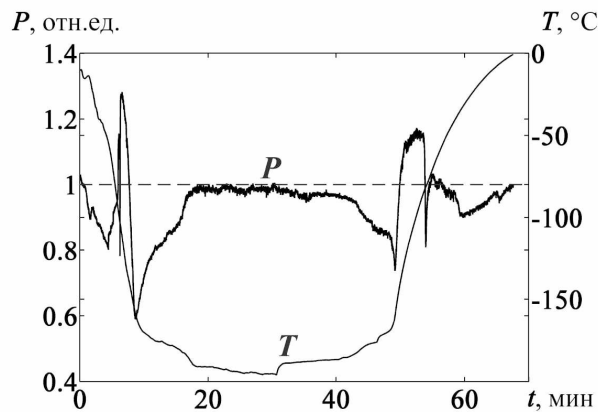
*Рис. 3.* Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения при заполнении волновода жидким аргоном

*Fig. 3.* The results of measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation when filling the waveguide with liquid argon



*Рис. 4.* Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения  $P$  при заполнении волновода водородом

*Fig. 4.* The results of the measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation  $P$  when filling the waveguide with hydrogen



*Рис. 5.* Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения  $P$  при заполнении волновода углекислым газом

*Fig. 5.* The results of measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation  $P$  when filling the waveguide with carbon dioxide

Есть изменения сигнала, но быстрых флуктуаций, связанных с конденсацией газа, не наблюдается. Углекислый газ при температуре  $-78.5$  °С переходит в твёрдое состояние, минуя жидкое.

**Выводы.**

1. В экспериментах по конденсации газа в жидкое состояние на внутренней поверхности металлических волноводов и измерении проходящей мощности на частоте 54.5 ГГц обнаружено уменьшение электромагнитных потерь при пропускании микроволнового излучения. Наблюдаемый эффект можно объяснить появлением высоко проводящей плёнки на границе металл – жидкость или на границе жидкость – воздух толщиной порядка 1 мкм (скин-слой).

2. Проводимость плёнки может быть выше проводимости меди. В части случаев в процессе конденсации пара проходящая мощность, по отношению к её значению для пустого волновода, значительно уменьшилась, что можно связать с изменением толщины плёнки и ухудшением её проводимости. Возможно также накопление жидкости в волноводе, которая увеличивает потери пропускания.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что метод исследования тонких слоёв жидкости с помощью микроволн может дать необычную и недоступную для других методов информацию. Тем более, в этом методе можно легко менять условия эксперимента – использовать микроволновое излучение разных длин волн, использовать волноводы, сделанные не только из меди, но и из других металлов, таких, как железо, латунь и т. д. Изменять интенсивность микроволнового излучения, изменять скорость конденсации жидкости и толщины плёнки.

**Список литературы**

1. Бордонский Г. С., Гурулёв А. А., Крылов С. Д. Электромагнитные свойства нанослоя жидкого азота на поверхности различных веществ при измерениях в резонаторе // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 12. С. 8–15.
2. Бордонский Г. С., Филиппова Т. Г. Влияние перколяции на диэлектрические свойства мёрзлых дисперсных сред // Конденсированные среды и межфазные границы. 2002. Т. 4, № 1. С. 21–26.
3. Вартамян Т. А., Гладских И. А., Леонов Н. Б., Пржибельский С. Г. Тонкие структуры и переключение электропроводности в лабиринтных плёнках серебра на сапфире // Физика твёрдого тела. 2014. Т. 56, вып. 4. С. 783–789.
4. Дунюшкина Л. А. Введение в методы получения плёночных электролитов для твёрдоокисных топливных элементов. Екатеринбург: УРО РАН, 2015. 126 с.
5. Ениколопян Н. С., Берлин Ю. А., Бешенко С. И., Жорин В. А. Аномально низкое электрическое сопротивление тонких плёнок диэлектриков // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33, вып. 10. С. 508–511.
6. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Процессы конденсации тонких плёнок // УФН. 1998. Т. 168, № 10. С. 1083–1116.
7. Лачинов А. Н., Воробьёва Н. В. Электроника тонких слоёв широкозонных полимеров // УФН. 2006. Т. 176, № 12. С. 1249–1266.
8. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. Т. 1. 439 с.
9. Рыжкин И. А., Петренко В. Ф. Протонная структура льда вблизи границы лёд – металл // ЖЭТФ. 2005. Т. 128, вып. 2. С. 364–369.
10. Уваров Н. Ф. Композиционные твёрдые электролиты. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 258 с.
11. Хасс Г. Физика тонких плёнок. М.: Мир, 1967. Т. 1. 343 с.
12. Чопра К. Л. Электрические явления в тонких плёнках. М.: Мир, 1972. 435 с.



13. Korobeynikov S. M., Drozhzhin A. P., Furin G. G., Charalambakos V. P., Agoris D. P. Surface conductivity in liquid-solid interface due to image force // Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL. 2002. P. 270–273.

14. Korobeynikov S. M., Melekhov A. V., Soloveitchik Yu. G., Royak M. E., Agoris D. P., Pyrgioti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 915–921.

*Статья поступила в редакцию 05.05.2017; принята к публикации 15.05.2017*

#### **Библиографическое описание статьи**

*Крылов С. Д.* Использование микроволнового излучения для исследования тонких плёнок жидкости на поверхности металла // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 52–58. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-52-58.

*Sergei D. Krylov,*

*Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher,  
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
(16 a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia),  
e-mail: lgc255@mail.ru*

#### **Using Microwave Radiation to Study Thin Liquid Films on a Metal Surface**

This paper presents results of an investigation of the electrical properties of thin liquid films on a metal surface by means of microwaves. The studies were carried out in a copper rectangular waveguide at frequency of 54.5 GHz. The microwave radiation power passing through the waveguide was measured. The films of liquid oxygen and argon on the walls of the waveguide were deposited by the method of condensation from gas to liquid upon cooling. The investigations were carried out under the assumption that the appearance of a liquid film on the walls of the waveguide will change the value of the transmitted power, i. e. it will depend on the properties of the film on the walls of the waveguide. Cooling was carried out with the help of liquid nitrogen. A decrease in the electromagnetic losses during the microwave radiation passing was detected. This effect can be explained by the appearance of a high-conductivity film at the boundary metal – liquid. Therefore, the use of microwaves to study thin layers of liquid on a metal surface can give unusual and not available for other methods information.

**Keywords:** microwave radiation, electric conductivity, thin liquid films, gas condensation

#### **References**

1. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D. Elektromagnitnye svoystva nanosloya zhidkogo azota na poverkhnosti razlichnykh veshchestv pri izmereniyakh v rezonatore // Pis'ma v ZhTF. 2011. Т. 37, вып. 12. S. 8–15.

2. Bordonskii G. S., Filippova T. G. Vliyanie perkolyatsii na dielektricheskie svoystva merzlykh dispersnykh sred // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy. 2002. Т. 4, № 1. S. 21–26.

3. Vartanyan T. A., Gladskikh I. A., Leonov N. B., Przhibel'skii S. G. Tonkie struktury i pereklyuchenie elektroprovodnosti v labirintnykh plenkakh serebra na sapfire // Fizika tverdogo tela. 2014. Т. 56, вып. 4. S. 783–789.

4. Duniyushkina L. A. Vvedenie v metody polucheniya plenochnykh elektrolitov dlya tverdooksidnykh toplivnykh elementov. Ekaterinburg: URO RAN, 2015. 126 s.
5. Enikolopyan N. S., Berlin Yu. A., Beshenko S. I., Zhorin V. A. Anomal'no nizkoe elektricheskoe soprotivlenie tonkikh plenok dielektrikov // Pis'ma v ZhETF. 1981. T. 33, vyp. 10. S. 508–511.
6. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Protsessy kondensatsii tonkikh plenok // UFN. 1998. T. 168, № 10. S. 1083–1116.
7. Lachinov A. N., Vorob'eva N. V. Elektronika tonkikh sloev shirokozonnnykh polimerov // UFN. 2006. T. 176, № 12. S. 1249–1266.
8. Lebedev I. V. Tekhnika i pribory SVCh. M.: Vysshaya shkola, 1970. T. 1. 439 s.
9. Ryzhkin I. A., Petrenko V. F. Protonnaya struktura l'da vblizi granitsy led — metall // ZhETF. 2005. T. 128, vyp. 2. S. 364–369.
10. Uvarov N. F. Kompozitsionnye tverdye elektrolity. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. 258 s.
11. Khass G. Fizika tonkikh plenok. M.: Mir, 1967. T. 1. 343 s.
12. Chopra K. L. Elektricheskie yavleniya v tonkikh plenkakh. M.: Mir, 1972. 435 s.
13. Korobeynikov S. M., Drozhzhin A. P., Furin G. G., Charalambakos V. P., Agoris D. P. Surface conductivity in liquid-solid interface due to image force // Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL. 2002. P. 270–273.
14. Korobeynikov S. M., Melekhov A. V., Soloveitchik Yu. G., Royak M. E., Agoris D. P., Pyrgiotti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 915–921.

*Received: May 05, 2017; accepted for publication May 15, 2017*

#### Reference to article

*Krylov S. D.* Using Microwave Radiation to Study Thin Liquid Films on a Metal Surface // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No. 4. PP. 52–58. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-52-58.

УДК 622.271.1:621.879.443

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-59-72

**Татьяна Юрьевна Панина,**

*кандидат экономических наук, старший преподаватель*

*Забайкальский аграрный институт*

*Иркутского государственного аграрного университета им. А. А. Ежесевского*

*(672023, Россия, г. Чита, ул. Юбилейная, 4),*

*e-mail: panirais@mail.ru*

**Михаил Витальевич Костромин,**

*доктор технических наук, профессор,*

*Забайкальский государственный университет*

*(672039, Россия, г. Чита, ул. Александрово-Заводская, 30),*

*e-mail: kostrmv@yandex.ru*

### **Геокриологические проблемы и их решения при разработке россыпных месторождений**

Работа драг при разработке россыпных месторождений зависит от наличия многолетней глубокой сезонной мерзлоты. Поэтому оттаивание и предохранение пород от промерзания имеют важное значение. В работе дан критический анализ основных, существующих на сегодня, способов оттаивания мёрзлых и предохранения от промерзания талых пород россыпных месторождений. Выявлены их достоинства и недостатки. Установлено, что наиболее эффективным способом предохранения дражных полигонов от глубокого сезонного промерзания является затопление водой при условии сохранения необходимого уровня воды в течение определённого срока (для условий Забайкалья минимальный срок – 150 суток). Для значительного снижения фильтрационных потерь через тело и основание плотины необходимо сооружать противофильтрационные экраны из полимерных плёнок или химического реагента – техническая натрий-карбоксилметилцеллюлоза (Na-МЦ). В результате проведённых исследований (лабораторных, объёмно-физического моделирования, математического моделирования, математического анализа, полупромышленных испытаний) разработана технология предохранения дражных полигонов от сезонного промерзания затоплением с использованием химических реагентов и полимерных плёнок. Разработаны технологические схемы предохранения пород от промерзания затоплением с использованием химического кольматажа и экранирования плотин полимерными плёнками. В результате проведённых исследований установлены необходимые размеры зуба и понура для конкретных условий месторождений, а также нормы расхода реагента, которые изменяются в пределах 0,5–3,0 кг/м<sup>2</sup> в зависимости от гранулометрического состава пород. Таким образом, проведением сравнительно дешёвых и малотрудоёмких мероприятий можно качественно решить проблему предохранения пород дражных полигонов от промерзания затоплением. Тем самым обеспечить, при условии успешного проведения других работ (ремонт драги и др.), ранний пуск драги, высокопроизводительную работу в течение промывочного сезона, позднюю остановку в заранее намеченном и подготовленном месте. За счёт этого добиться значительного увеличения сезонной производительности и уменьшения удельных затрат на добычу 1 м<sup>3</sup> горной массы или единицы металла.

**Ключевые слова:** геокриология, многолетняя мерзлота, сезонная мерзлота, россыпь, пески, оттайка, предохранение от промерзания, фильтрация, противофильтрационные экраны, плёнки, химические реагенты, зуб, понур

Успешная работа добычных горных механизмов и машин, в частности, драг, при разработке россыпных месторождений зависит от многих факторов; одним из важнейших является отсутствие или наличие многолетней и глубокой сезонной мерзлоты. Опыт работы драг средней и большой мощности показывает, что они могут успешно работать при наличии сезонного промерзания пород до 0,5–0,8 м. В случае большей величины промерзшего слоя в весеннее время резко ухудшается работа всех механизмов, увеличивается их износ, производительность падает на 50–60 %, иногда и более, себестоимость драгирования 1 м<sup>3</sup> песков при этом увеличивается в несколько раз. Поэтому оттайка и предохранение пород от сезонного промерзания при разработке россыпных месторождений имеют важное значение как для снижения себестоимости добычи металла и увеличения производительности драг, так и для предотвращения износа их механизмов, продления срока службы. В Забайкалье 8 среднелитражных драг, работающих на полигонах, поражённых на 20–30 % многолетней мерзлотой и промерзающих зимой на глубину 2,5–4,0 м, из-за нерешённой проблемы оттайки и предохранения от сезонного промерзания работают с годовой производительностью 400–700 тыс. м<sup>3</sup>, в то время как на оттаянных предохранённых полигонах 250-литровые драги в аналогичных условиях могут промывать за сезон 1–1,4 млн м<sup>3</sup> (драги северной части Красноярского края, Амурской области). Оттайка мерзлоты на россыпях Забайкалья в основном производится естественным способом с использованием энергии солнечной радиации, однако вскрыша ведётся на незначительную глубину (0,5–1,0 м) и в недостаточных объёмах (50–150 тыс. м<sup>3</sup>) реже 200–300 тыс. м<sup>3</sup> на полигоне одной драги. Предохранение пород от промерзания чаще всего проводится затоплением, но из-за фильтрации через тело плотины и основание в большинстве случаев не удаётся сохранить необходимый уровень воды, что приводит к значительному сезонному промерзанию полигонов (до 2,0–3,0 м). Вследствие этих причин снижается производительность драг, увеличивается себестоимость добычи. Расчёты показывают, что при полном решении проблемы можно дополнительно получить прирост добычи песков до 3 млн м<sup>3</sup> в год, что равносильно постройке 3–4 новых 250-литровых драг [5]. Как уже отмечалось выше, оттайка и предохранение пород от сезонного промерзания при дражной разработке россыпей являются актуальными проблемами. Оттайка мёрзлых горных пород производится в основном гидроигловым и естественным способами. Фильтрационно-дренажный и фильтрационно-дождевальными способами, а также оттайка при помощи пара, горячей воды и электрического тока имеют незначительный удельный вес.

Гидроигловый способ заключается в оттайке пород водой подаваемой в иглы, представляющие собой стальные трубы диаметром 34–42,0 мм с отверстиями на нижнем конце, от источника по металлическим и резиновым трубопроводам при помощи насосов или самотёком. Иглы периодически забивают в грунт на величину оттаявшего слоя или погружают в заранее пробуренные скважины. Забивку игл производят при помощи электровибраторов или вручную. Скважины в некоторых случаях бурят непосредственно иглами, которые в этом случае снабжаются буровыми коронками. Температура воды при оттайке должна быть выше температуры мёрзлых пород не менее чем на 5–70 °С. Расход воды составляет 7–15 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> оттаявших пород [10].

Естественный способ оттайки основан на максимальном использовании тепловой энергии солнечной радиации. Для этого ранней весной с наступлением положительных температур убирают снежный покров. Оттайка ведётся послойно путём снятия оттаявшего слоя на глубину 6–20 см бульдозерами или с наполнением (аккумуляцией) талого слоя. Для ускорения процесса оттайки используют полимерные плёнки, которые настилаются на по-

лигон после уборки снежного покрова. Температура под пленкой на 7–100 °С выше температуры воздуха [10].

Глубина оттаивания за сезон без применения плёнки составляет 2–3 м и в зависимости от климатических условий, с плёнкой в 1,4–1,6 раза больше [20].

На Ундинском прииске комбината «Балейзолото» для ускорения оттаивания проводились работы по нанесению плёнок из битумной эмульсии и фуриловой смолы. Скорость оттайки также увеличивается в 1,4–1,6 раза [17].

При разработке россыпных месторождений применяются различные способы предохранения от промерзания, которые можно подразделить на следующие: предохранение местными теплоизоляционными материалами, снегозадержание, рыхление верхнего слоя горных пород, предохранение при помощи искусственных теплоизоляционных материалов, затопление водой.

Небольшие участки предохраняют местными теплоизоляционными материалами (опилками, камышитовыми матами, шлаком, торфом и др.), снегозадержанием, рыхлением, полимерными плёнками [9; 19]. Предохранение больших площадей производится затоплением водой, укладкой пенопластовых щитов, искусственным снегом, пеной [4; 13].

Выбор того или иного способа зависит от горнотехнических и климатических условий района месторождения.

Предохранение полигонов при помощи местных теплоизоляционных материалов осуществляется на необводнённых месторождениях в условиях малоснежной зимы, на небольших участках. При разработке россыпей в настоящее время этот способ малоэффективен, экономически неоправдан и имеет вспомогательное значение.

Снегозадержание применяется в районах с суммой отрицательных градусо-суток менее 4000, при раннем выпадении обильного устойчивого снежного покрова. Для снегозадержания используют настил из хвойных ветвей, вырубленные кустарники, а также щиты и другие средства. Щиты обычно применяют размерами 1 × 2 м, изготавливаемые решётчатыми из теса (1,5 × 5 см), который прошивают с промежутками от 5 до 15 см. Щиты устанавливают по 5–6 в ряд с интервалами 15–20 см, расстояниями между рядами 15–30 м. По мере роста слоя снега до 2/3 высоты щитов последние переставляются; за зиму щиты переносятся до 5 раз. Для снегозадержания на площади 1 га требуется 60–100 щитов. Можно также производить снегозадержание путём образования снежных валов тракторными валкообразователями [7].

Глубина промерзания при накоплении значительного слоя снега уменьшается в 2 раза на Урале и в Сибири, а на Колыме – не более чем на 10 % [9].

По данным В. Г. Лешкова, в условиях комбината «Лензолото» сезонная мерзлота на защищаемых участках составляет около 0,6 м против 1,1–1,6 м на незащищённых площадях [7].

С наступлением положительных температур снежный покров рекомендуется удалять бульдозерами для ускорения процесса естественного оттаивания или применять зачернение угольной пылью, шлаком, грунтом.

Недостатком защиты пород от промерзания снегозадержанием является ограниченность его применения. Этот способ возможен только в районах с мощным и устойчивым снежным покровом, который необходимо удалять в ранне-весенний период. Эффективность снегозадержания по сравнению с другими способами невысока.

В Забайкалье с его малоснежной (толщина снежного покрова 10–15 см) и суровой (температура воздуха до минус 40–45 °С) зимой этот способ малопримем.

Рыхление верхнего слоя пород во время начала сезонного промерзания на глубину до 0,5–0,6 м производится тракторными рыхлителями. Перед рыхлением поверхность полигона необходимо очистить от глыб, валунов, убрать лес, пни [9; 19].

Рыхление необходимо проводить при положительных температурах. Благодаря нарушению естественной структуры поверхностного слоя и увеличению пористости пород уменьшается их теплопроводимость, что приводит к уменьшению отрицательных тепловых потоков.

Рекомендуется рыхление производить продольно-поперечными смежными ходами, т. к. в этом случае не образуется сквозных пустот, способствующих увеличению конвективной составляющей теплового потока. Сезонное промерзание пород под разрыхленным слоем мощностью 50–60 см уменьшается на 50–60 % (по фактическим данным под разрыхленным слоем 0,6 см составило 1,6–1,7 м против 3,5–4,0 м в естественных условиях).

Разрыхленный слой заносится снегом и становится малотеплопроводным ( $\lambda = 0,3$  Вт/м.град). Рыхление достаточно эффективно лишь в районах с умеренным климатом и при низком уровне грунтовых вод (не менее 0,8 м от поверхности) [2; 16].

Иногда применяют осушение галечно-гравелистых пород при помощи самотечной дренажной канавы или колодцами с насосными установками, что позволяет снизить влажность и предотвратить прочное смерзание пород. Применение этого способа ограничено и носит вынужденный характер, когда другие способы по какой-либо причине применить не удаётся [16].

Щиты из полистирольного пенопласта ПС-Б применяют в ряде районов из-за отсутствия воды в зимний период. Такой теплоизоляционный покров можно создать в любых условиях, независимо от рельефа местности, уровня грунтовых вод, фильтрационных свойств пород, климатических условий и режима притока поверхностных вод. Обычно щиты изготавливаются шестигранной формы в плане, допускается прямоугольная, толщина их 20–35 см, площадь 2,0–2,6 м<sup>2</sup>.

Щиты изготавливаются из гранулированного полистирола на специальных установках с использованием пара, в редких случаях изготавливают склеиванием готовых плит (размер их 60 × 90 см, толщина 5, 10 см) при помощи специальных клеев ВИАМ-Б-3, ВК-1 и других, которые наносятся по контуру плит.

Щиты настилают за несколько дней до перехода через 0 °С среднесуточных положительных температур воздуха. Перед укладкой с полигона удаляются пни, кустарники, валуны. Поверхность разравнивается бульдозером так, чтобы можно было удобно укладывать плиты. При раннем выпадении снега щиты допускается укладывать на снежный покров, который играет роль уплотнителя. Настил из пенопластовых щитов требует предохранения от повреждений, не допускает хождения по нему и проведения взрывных работ вблизи, что является недостатком способа [4].

Толщину покрова определяют по номограмме, составленной А. И. Приймаком, в зависимости от допускаемых тепловых потерь за период действия настила, числа отрицательных градусо-суток и коэффициента теплопроводности материала, а также в зависимости от назначения. Промерзание допускается на величину 0,1–0,2 м, если породы разрабатываются сразу же после снятия покрова; 1–1,2 м – если разработка начинается по времени несколько позднее снятия покрова и породы успевают оттаять под действием солнечной радиации; 2,0 м – если после уборки теплоизоляционного покрова для ускорения оттаивания применяют полимерные плёночные покрытия [2; 11].

В некоторых случаях под настил из пенопластовых щитов укладывают электрические нагреватели, в качестве которых служит изолированный железный или медный провод, уложенный параллельными рядами через 0,2–0,5 м. Этим достигается управление процессом промерзания под теплоизоляционным покровом. При настиле из пенопласта толщиной 15 см требуется средняя мощность подогрева 5–7 Вт/м<sup>2</sup>. По данным В. М. Наточинского, промерзание под пенопластовым настилом толщиной 15 см, под которым был проложен медный провод диаметром 0,6 мм с интервалом 0,25 м, составило 1,1 м против 3,7–3,9 м в

естественных условиях. При использовании стального провода сечением 1,2 мм с интервалом 0,3 м глубина промерзания – 1,5 м [8].

Основным недостатком предохранения пород от промерзания пенопластовыми щитами является большая трудоёмкость работ и сравнительно небольшая эффективность. Его применяют в тех случаях, когда предохранение водой невозможно по какой-либо причине.

Искусственный снег и пена различного состава применяются для защиты пород от промерзания в малоснежных районах, когда невозможно произвести качественное затопление полигонов водой. В 1968–1971 годах институтом «Иргиредмет» проводились исследования по усовершенствованию способа защиты горных пород от промерзания пеной. На основе широких исследований различных ПАВ установлено, что для получения пены необходимы алкилсульфонат, вода и сжатый воздух. Алкилсульфонат получают из парафина при одновременном действии хлора и сернистого ангидрида ( $\text{SO}_2$ ) с последующим омылением (обработка  $\text{NaOH}$ ). Общая формула вещества  $\text{R-SO}_3\text{Na}$ . По внешнему виду пенообразователь представляет пасту светло-жёлтого цвета с удельным весом 1,15 г/см<sup>3</sup> рН однопроцентного водного раствора 7,5–8,5, содержит до 30 % воды. Продукт не имеет осадка и посторонних включений, не горюч, не ядовит, обладает слабым запахом. Длительное хранение при отрицательных температурах и последующее нагревание до 200 °С не меняет его пенообразующих свойств [12; 13].

Для получения пены необходима специальная установка, в основу конструкции которой положен принцип механического перемешивания смеси воздуха и водного раствора ПАВ турбулентным потоком в длинном рукаве.

Установка состоит из двух основных насосов, узла приготовления пенообразователя со вспомогательным насосом, пеносмесителя с дозировочным устройством, узлов смешивания раствора и воздуха и резиновых рукавов.

По способу водоснабжения предполагается три варианта работы:

- 1) установка располагается непосредственно у водоёма и оба основных насоса находятся в помещении;
- 2) установка располагается на некотором удалении от водоёма и один из основных насосов выносится к месту забора воды;
- 3) установка снабжается привозной водой и оборудуется специальной ёмкостью.

Вода может использоваться из любого пресного источника, допускается наличие механических примесей. Присутствие солей кальция и магния до 15 мг/л существенного влияния на пенообразование не оказывает.

Сжатый воздух получают от компрессора и особых требований к нему не предъявляют.

Пенообразователь перед растворением необходимо оттаять и тщательно перемешать. Раствор эмульгатора концентраций 20–25 % приготавливают в специальном баке, где его необходимо нагреть электроподогревом до температуры 60–70 °С и предварительно перемешать.

При работе пеногенераторной установки вода под напором основных насосов смешивается с пенообразователем и поступает по магистрали в водораспределитель и далее через вентили по трём параллельным шлангам к узлам смешивания раствора с воздухом (воздухосмесителям). Воздух от компрессора поступает в воздухораспределитель и далее – по трём магистралям в воздухосмесители. Проходя через воздухосмеситель, раствор пенообразователя и воздух попадают в резиновый рукав, где при интенсивном турбулентном перемешивании двухфазного потока происходит пенообразование [13].

Наносить пену необходимо при наступлении устойчивых отрицательных температур (не выше минус 10–15 °С).

Для создания пенного теплоизоляционного покрова необходимым условием является полная смерзаемость жидкой фазы, что достигается нанесением пены слоями толщиной не более 2–3 см, как правило, этот фактор снижает производительность.

Чем ниже температура, тем большая толщина такого слоя пены допускается. При температуре минус 25 °С и ниже получается наиболее прочная пена, дающая в дальнейшем малую усадку.

Защищаемый полигон разбивается на участки прямоугольной формы, разделенные дорожками, размеры участков зависят от длины рукавов и дальности полёта струи пены и в среднем составляют 25 × 70 м. Пена наносится по обе стороны от дорожки с равномерным распределением по всей площади. В начальный период необходимо охватить максимальную площадь и довести толщину слоя пены на ней до 15–20 см, с тем, чтобы резко уменьшить теплопотери оголённого грунта в начале зимы. В дальнейшем наращивают толщину покрытия в любой последовательности, периодически переходя с одной дорожки на другую. При необходимости оборудуют вторую стоянку пеногенераторной установки.

После намораживания слоя пены величиной 15–20 см весь полигон желательно покрыть пеной кратностью 3–5 для образования тонкой защитной корки льда (3–4 мм), которая не только увеличивает прочность покрытия, но и препятствует его выдуванию. В районах с сильным ветром эта операция обязательна. Пену кратностью 3–5 получают, уменьшив расход пенообразователя.

Испытания пенных покрытий проводились на дражных полигонах комбината «Инди-гирзолото» и на опытных площадках гор. Иркутская.

При сезонном промерзании 2,2 м толщина покрова 25–40 см уменьшает промерзание до 1,3–1,4 м, а слой пены в 40–70 см и 70–100 см – соответственно до 1,1–1,3 м и до 0,8–1,0 м.

Свойства замороженной пены непостоянны во времени и зависят от различных факторов. Непосредственно после нанесения пена имеет удовлетворительные механические свойства и предел прочности на сжатие достигает 100 кг/м<sup>2</sup>. В дальнейшем под действием температуры, температурного градиента и механической нагрузки прочность пены снижается, что приводит к самоуплотнению и ухудшению теплоизоляционных свойств. Чем выше температура пены, тем большей плотности при усадке она достигает. При высоких температурах пены (минус 1–2 °С) плотность нижнего слоя для метрового пласта доходит до 150–170 кг/м<sup>3</sup>, при более низких (минус 15–20 °С) – до 100–120 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности пены зависит от её температуры и плотности и равен 0,06–0,18 ккал/м час. град. Удельная теплоёмкость пены равна удельной теплоёмкости льда и составляет 0,5 ккал/кг. град.

К недостаткам пенных покрытий можно отнести: высокую себестоимость предохранения; необходимость сооружения специальной дорогостоящей пеногенераторной установки; значительную трудоёмкость работ по нанесению пены, а также потери времени из-за устранения перемерзания рукавов при низких температурах; возможность создания теплоизоляционного покрова только при низких температурах (минус 10–15 °С), когда породы уже промерзают на некоторую глубину (30–50 см); необходимость подогрева раствора до 60–70 °С, что не всегда возможно; зависимость от источника водоснабжения; нецелесообразность применения пены в районах со значительным снежным покровом.

Предохранение пород от промерзания полимерными плёнками проводилось на северо-востоке. Плёнка укладывалась на полигон до наступления морозов. Талые породы сохранялись под плёнкой в течение 3–4 недель после наступления морозов, затем начиналось промерзание. Но независимо от числа уложенных слоёв породы промерзают не менее чем на 1,6 м [19; 20]. Необходимо отметить физико-химические способы предохранения пород от промерзания, которые, вероятно, найдут применение при определённых условиях разработки россыпных месторождений. Сущность этих способов заключается в понижении тем-



пературы замерзания поровой влаги, вследствие введения в неё водорастворимых солей: хлористого натрия и кальция, хлоридов, сульфитно-спиртовой барды и др. [3].

Известно применение растворов хлористого натрия для предохранения пород на стройках городов Ангарска и Гомеля, на строительстве Вилуйской ГЭС применялись хлористые натрий и кальций [14]. Имеется и зарубежный опыт по обработке грунтов водорастворимыми солями как в строительстве, так и в горном деле при предохранении откосов уступов в карьере роторных экскаваторов [21; 22].

Анализ научных исследований и опыта физико-химического способа предохранения пород от промерзания показывает, что он обладает значительной трудоёмкостью и высокой себестоимостью предохранения. Поэтому, по нашему мнению, этот способ при разработке россыпей может применяться лишь в небольших масштабах.

Из всех способов предохранения горных пород от промерзания наибольший интерес вызывает затопление полигонов водой. В определённых горно-геологических условиях этот способ наиболее эффективен и экономичен по сравнению с другими при условии сохранения уровня воды, т. к. позволяет с минимальными затратами полностью предохранить породы от промерзания. Сущность его заключается в сооружении плотин, дамб, перемычек, перекрывающих русло рек и создающих водохранилища на защищаемом полигоне. Гидротехнические сооружения возводятся обычно из местных материалов (галька, торф вскрыши, ил, дражные отвалы и др.). Величина слоя воды для полного предохранения пород должна быть больше глубины сезонного промерзания водоёмов на 0,3–0,5 м.

Для условий Забайкалья минимальная глубина затопления колеблется от 2,0 до 2,8 м.

Параметры земляных плотин в условиях разработки россыпей, исходя из непродолжительности срока их эксплуатации (1–3 года), устанавливаются обычно следующие: высота 2–5 м, реже до 10–12 м, ширина по верху 3–6 м, уклон мокрого откоса  $1 : 2 \div 3$ , сухого откоса  $1 : 1 - 2$ .

Длина плотин зависит от ширины долины и равняется обычно 200–600 м, иногда до 1–3 км. Расстояние между плотинами зависит от глубины затопления и уклона долины и составляет от 200 м до 1–5 км. Как уже отмечалось, плотины в основном сооружаются из местных пород, но иногда используются привозные водонепроницаемые материалы (глины, суглинки), используемые на сооружение тела плотины или отдельных её элементов (экрана, зуба), перевозимые иногда на большие расстояния [16].

Плотины чаще всего сооружают бульдозерами при вскрытии торфов или специально, иногда для этой цели используются экскаваторы по транспортным и бестранспортным схемам, скреперы. В некоторых случаях плотины и перемычки создаются дражными отвалами при помощи определённой системы ходов драги с дальнейшим перемещением отвалов бульдозерами.

Условиями успешного предохранения пород от промерзания являются: сравнительно узкие долины рек (до 300–400 м); незначительная водопроницаемость пород тела плотины и основания.

При сильно водопроницаемых породах, слагающих россыпь, когда невозможно сохранить необходимый уровень воды, применяют следующие мероприятия, способствующие предохранению пород от промерзания: накопление запаса воды для подпитки основного водохранилища, перекачка воды, оставление воздушно-ледяных промежутков, сооружение экранов из водонепроницаемых материалов и полимерных плёнок.

Метод накопления определённого запаса воды заключается в том, что выше предохраняемого полигона сооружается один или несколько водоёмов. По мере понижения уровня в водохранилище основной плотины производится подпитка из вспомогательных водохранилищ [16].

Для поддержания определённого уровня также применяется перекачка воды на предохраняемый участок, где используются насосы средней производительности [16].

Для сокращения фильтрационных потерь через тело и основание плотины сооружают противофильтрационные экраны и завесы, исходным материалом для которых служат: верхний слой торфов, водопроницаемость их значительно меньше, чем песчано-галечниковых отложений, суглинки, глина, которые добываются экскаватором и транспортируются к месту работ автосамосвалами (стоимость таких плотин обычно высокая) [16]; смолы, илесто-глинистые отложения, опилки и т. д. для кольматации [8]; ледогрунтовые экраны [18].

Технология сооружения таких противофильтрационных устройств заключается в возведении тела плотины, проходке зуба в основании плотины, укладке на верховом откосе плотины и зуба водонепроницаемого материала, который при необходимости можно засыпать защитным слоем пород. Проходку зуба и сооружение противофильтрационного экрана можно осуществлять при помощи бульдозеров, скреперов, экскаваторов. Транспортирование водонепроницаемого материала производят автосамосвалами, бульдозерами, реже скреперами. Характерной чертой таких противофильтрационных сооружений является значительная их стоимость и трудоёмкость работ.

В последнее время в качестве противофильтрационного экрана, не только в горном деле, но и в гидротехническом строительстве весьма эффективно стали использовать полимерные плёнки (полиэтиленовые, полихлорвиниловые), которые укладываются по всему мокрому откосу и зубу, иногда в приплотинной части в виде понура длиной до 50 м [5].

Экраны из полимерных плёнок позволяют не менее, чем в два раза уменьшить фильтрационные расходы, снизить стоимость сооружения плотин на 20–30 % за счёт отсыпки их из грунтов, расположенных непосредственно вдоль створа и уменьшения объёмов, снизить на 30–40 % трудоёмкость последующей разработки плотин до окончания их оттаивания.

Все эти факторы говорят о значительной эффективности пленочных экранов при разработке россыпей.

К наиболее существенным недостаткам плёночных экранов следует отнести их повреждаемость при отсыпке защитного слоя и, самое главное, сложность экранирования подземного контура. Как правило, удаётся лишь частично перекрыть фильтрующую россыпь (водоносный горизонт) ниже основания плотины. Довольно часто фильтрация наблюдается через обваловку или естественные подрусловые пути движения подземных вод. Как показала практика, экранирование земляных плотин плёнками, являясь достаточно простым в техническом отношении и экономичным противофильтрационным средством, не всегда является эффективным, что, естественно, вызывает отрицательное отношение со стороны производителей.

Исследования кольматирующей эффективности, а также стоимостных показателей, масштабов серийного производства и технологичности позволили выбрать в качестве реагента для кольматоза низконапорных земляных плотин техническую натрийкарбоксиметилцеллюлозу (Na-КМЦ). Техническая карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ, ГОСТ 5.588-70), представляет собой натриевую соль целлюлозногликолевой кислоты. Продукт получают обработкой щелочной целлюлозы монохлоруксусным натрием. Химическая формула –  $[C_6H_7O_2(OH)_{3-x}(OCH_2COONa)_x]_n$ . Натрий-карбоксиметилцеллюлоза представляет собой мелкозернистый порошкообразный материал белого или кремового цвета (иногда выпускается в виде волокнистого продукта).

В результате проведённых исследований (лабораторных, объёмно-физического моделирования, математического моделирования, математического анализа, полупромышленных испытаний) разработана технология предохранения дражных полигонов от сезонного промерзания затоплением с использованием химических реагентов и полимерных плёнок [6].

Было установлено, что полотнища плёнки можно настилать на мокрый откос и понур, как вдоль продольной оси плотины, так и поперек неё. В предыдущих работах предлагается сваривать полотнища плёнки между собой, что само по себе является достаточно трудоёмкой операцией. Нами установлена возможность укладки полотнища плёнки без сварки. При этом плёнка укладывается в 2 слоя с перекрытием полотнищ на 20–30 см. Верхний слой экрана укладывается таким образом, чтобы продольная средняя линия полотнища проходила по шву нижней части экрана. Необходимым фактором является отсыпка предохранительного и защитного экранов из песчаных пород толщиной 0,1–0,2 м.

При создании экранов из химических реагентов рассматривалось два возможных варианта: обработка горных пород компонентами, находящимися в жидком состоянии (раствор КМЦ в воде) и в твёрдом (порошкообразном).

Возведение дамбы и проходку «зуба» до водоупора или на возможную глубину можно вести одновременно или поочередно, причём борт «зуба» со стороны плотины, который подлежит обработке химическим реагентом, должен иметь откос не более 1 : 3, 1 : 2, т. е. такой же, как и мокрый откос плотины. Работы по обработке поверхности плотины и «зуба» реагентом производятся до перекрытия «прорана» или запуска воды на полигон, если русло реки находится в стороне.

При обработке горных пород по первому варианту (растворами КМЦ) необходимо заранее создавать растворные узлы, насосную станцию для подачи раствора КМЦ на обрабатываемые поверхности. Часто сооружение плотины для предохранения пород от сезонного промерзания ведётся при отрицательных температурах воздуха (конец октября – начало ноября), поэтому для подогрева воды придётся предусматривать узел обогрева. Обработку пород растворами можно производить также при помощи поливочных машин. Реагент в этом случае засыпается в цистерну с водой и интенсивно перемешивается насосом. Автомобиль при работе перемещается по гребню плотины, либо вдоль её основания.

После обработки поверхности мокрого откоса плотины и «зуба» наблюдается перемещение раствора к основанию, вследствие чего концентрация реагента на поверхности пород очень неравномерная (повышается от вершины плотины к основанию).

Таким образом, вариант кольматажа горных пород жидкими реагентами имеет ряд существенных недостатков: сложность и трудоёмкость приготовления растворов и последующей обработки пород; неравномерность концентрации растворов КМЦ по поверхности плотины и «зуба», вследствие чего эффективность тампонажа снижается.

Порошковая технология кольматажа горных пород устраняет эти недостатки. Нанесение реагента возможно ручным и механизированным способами при помощи машин для разбрасывания удобрений, применяемых в сельском хозяйстве.

В бункер машины загружается из мешков 3500 кг порошка КМЦ. Машина транспортируется поперек плотины параллельными ходами бульдозером. Перекрытие смежного хода должно составлять не менее 50 см. Расход реагента можно регулировать. Нанесение реагента на поверхность при небольших масштабах работ (плотин длиной 200–300 м, высотой 4–6 м) можно производить вручную. После растаривания (извлечения из мешков) реагент измельчается лопатой, при помощи которой производится разбрасывание порошка равномерным слоем, толщина которого зависит от удельного расхода реагента. Таким образом, обрабатывается мокрый откос построенной плотины, борт траншеи «зуба» со стороны плотины. Нанесение порошкового реагента производится непосредственно на породы, из которых сложено тело плотины и её основание, или на предварительно отсыпанный защитный (предохранительный) слой из песчаных пород толщиной 0,1–0,2 м, если плотина и её основание представлены галечником диаметром более 5–10 см.

Желательно производить отсыпку земляного слоя толщиной 0,1–0,2 м из пород любых гранулометрического состава, роль которого состоит в том, чтобы предотвратить смещение

кольматажа к основанию плотины после затопления полигона, т. к. коэффициент сцепления реагента с породой после соприкосновения с водой резко снижается, а также предотвратить разрушение нанесённого слоя быстрым движением потока воды (3–5 м/с). Отсыпку защитного слоя можно заменить дождеванием реагента с расходом воды 3–5 л/м<sup>2</sup>. В тех случаях, когда по какой-либо причине проходка «зуба» невозможна, целесообразно обработать приплотинную часть водоёма (понура) длиной не менее 25–50 м. Эффективность такого кольматажа несколько ниже, чем с проходкой «зуба», но во многих случаях является единственным возможным.

Трудоёмкость работ по нанесению предварительно заготовленной КМЦ незначительная и составляет: при длине плотины 200–300 м, высоте 5,0 м, длине обработанной приплотинной части 50 м 16–20 чел/смену при ручной обработке и 2–3 маш/смены при механической.

На основе ранее выполненных исследований и внедрения в производство установлено, что наиболее эффективными являются экраны плотин из полимерных плёнок и химического реагента натрий-карбоксилметилцеллюлозы (КМЦ). В результате лабораторных исследований, объёмно-физического и математического моделирования, промышленных испытаний и внедрения установлено, что фильтрационный расход через тело и основание плотины зависит от глубины зуба, длины понура и удельного расхода реагента.

Разработаны технологические схемы предохранения пород от промерзания затоплением с использованием химического кольматажа и экранирования плотин полимерными плёнками:

- а) сооружение плотины с кольматажем или экранированием мокрого откоса плотины;
- б) сооружение плотины с кольматажем или экранированием мокрого откоса плотины и зуба, пройденного не на всю мощность рыхлых отложений;
- в) сооружение плотины с кольматажем или экранированием мокрого откоса плотины и зуба, пройденного до плотика;
- г) сооружение плотины с кольматажем или экранированием мокрого откоса и понура;
- д) сооружение плотины с кольматажем или экранированием мокрого откоса понура и зуба, пройденного не на всю мощность рыхлых отложений.

В результате проведённых исследований установлены необходимые размеры зуба и понура для конкретных условий месторождений, а также нормы расхода реагента, которые изменяются в пределах 0,5–3,0 кг/м<sup>2</sup> в зависимости от гранулометрического состава пород.

При высокой водопроницаемости пород  $K_f=50-100$  м/сут и более целесообразно применять комбинированную схему, т. е.: экранирование тела плотины, понура или «зуба» полиэтиленовой плёнкой с последующей химической кольматацией. После сооружения плотины и проходки укладываются полотнища плёнки, отсыпается защитный слой толщиной до 0,2 м и производится обработка химическим реагентом (расход не менее 2 кг/м<sup>2</sup>) обычным способом.

Таким образом, проведением сравнительно дешёвых и малотрудоёмких мероприятий можно качественно решить проблему предохранения пород дражных полигонов от промерзания затоплением. Тем самым обеспечить, при условии успешного проведения других работ (ремонт драги и др.), ранний пуск драги, высокопроизводительную работу в течение промывочного сезона, позднюю остановку в заранее намеченном и подготовленном месте. За счёт этого добиться значительного увеличения сезонной производительности и уменьшения удельных затрат на добычу 1 м<sup>3</sup> горной массы или единицы металла.

#### *Список литературы*

1. Глебов В. Д., Лысенко В. П. Конструирование плёночных противофильтрационных элементов в плотинах и перемычках // Гидротехническое строительство. 1973. № 5. С. 33–35.

2. Гольдтман В. Г., Знаменский В. В., Чистопольский С. Д. Гидравлическое оттаивание мёрзлых горных пород. Магадан: Труды ВНИИ-1, 1970. Т. 3. 450 с.
3. Емельянов У. Г. Применение хлористого натрия для предохранения грунтов от замерзания // Подготовка мёрзлых грунтов для устройства фундаментов: сб. науч. тр. М.: Стройиздат, 1968.
4. Костовецкий В. П. Горное производство и // Тр. ГИГХС. М., 1981. Вып. 53.
5. Костромин М. В., Позлутко С. Г. Повышение эффективности разработки техногенных и природнотехногенных россыпей // Горный журнал. 1996. № 9–10. С. 17–21.
6. Костромин М. В. Предохранение дражных полигонов от промерзания с использованием плотин // Недра Востока. 1993. С. 34–37.
7. Лешков В. Г. Теория и практика разработки россыпей многочерпаковыми драгами. М.: Недра, 1980. 352 с.
8. Наточинский В. И. Подготовительные работы при разработке россыпных месторождений. М.: Недра, 1975. 168 с.
9. Стафеев П. Ф. Глубокое рыхление дражных полигонов // Колыма. 1966. № 6.
10. Потемкин С. В. Оттайка мёрзлых пород. М.: Недра, 1991. 160 с.
11. Приймак А. И. Изучение применяемости пенопластов для предохранения грунтов от сезонного промерзания. Магадан: Труды ВНИИ-1, 1966. Т-25.
12. Пятаков В. Г. Научно-методическое обоснование интенсификации процессов дражных разработок многолетнемёрзлых россыпных месторождений неглубокого залегания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1994. 39 с.
13. Пятаков В. Г., Левинский Б. В., Ведяев Ю. М. Совершенствование способа предохранения пород от сезонного промерзания пенными покрытиями // Разработка рудных и россыпных месторождений. Иркутск: Иргиредмет, 1973. С. 71–80.
14. Размораживание грунтов с применением раствора хлористого натрия / В. И. Буй [и др.] // Обогащение песка и размораживание грунтов. М.: Стройиздат, 1996.
15. Рашкин А. В., Шувалов Н. Г. Исследование тампонажных растворов на основе натрийкарбоксилцеллюлозы // Колыма. 1971. № 1. С. 14–16.
16. Стафеев П. Ф. Драгирование забайкальских россыпей. Иркутск: Вост.-Сиб. изд-во, 1974. 12 с.
17. Стафеев П. Ф. О теплотехническом эффекте плёночных покровов при оттаивании мёрзлых пород // Колыма. 1970. № 70.
18. Трупак Н. Строительство земляных плотин на вечномёрзлых грунтах // Гидротехническое строительство. 1970. № 9. С. 8–11.
19. Шорохов С. М. Технология и комплексная механизация разработки россыпных месторождений. М.: Недра, 1973. 795 с.
20. Эффективность применения плёночных покровов для оттаивания мёрзлых грунтов / Р. Н. Новосельский [и др.] // Колыма. 1969. № 6.
21. Hans J.B. Use of salt in clay core aids winter dam building // Engineering New-Record. 1953. No. 6.
22. Shuman Horst. Mabnahmen in Tegebauvorfeld und an den Baggerborschungen zur Verbesserung der Winterarbeit im Braunkohlenbergban // Neue Bergbautechnik. 1973. No. 11. P. 801–807.

*Статья поступила в редакцию 05.06.2017; принята к публикации 17.06.2017*

**Библиографическое описание статьи**

Панина Т. Ю., Костромин М. В. Геокриологические проблемы и их решения при разработке россыпных месторождений // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 59–72. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-59-72.

**Tatyana Yu. Panina,**

*Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer,  
Transbaikal Agrarian Institute*

*A. A. Ezhevsky Irkutsk State Agrarian University*

*(4 Yubileynaya st., Chita, 672023, Russia),*

*e-mail: panirais@mail.ru*

**Mikhail V. Kostromin,**

*Doctor of Engineering Science, Professor,*

*Transbaikal State University*

*(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),*

*e-mail: kostrmv@yandex.ru*

**Geocryological Problems and Their Solutions in the Development of Placer Deposits**

The work of dredges in the development of placer deposits depends on the presence of long-term deep permafrost. Therefore, thawing and preventing the rocks from freezing are important. The paper gives a critical analysis of the main current methods of thawing of frozen and preventing the freezing of thawed rocks of placer deposits. Their advantages and disadvantages are revealed. It has been established that the most effective way to protect dredging polygons from deep seasonal freezing is flooding with water provided that the required water level remains for a certain period of time (for the Transbaikalian conditions, the minimum period is 150 days). To significantly reduce the loss of filtration through the body and foundation of the dam, it is necessary to build anti-filtration screens of polymer films or chemical reagents – technical sodium carboxymethylcellulose (Na-CMC). As a result of the conducted studies (laboratory, volumetric-physical modeling, mathematical modeling, mathematical analysis, semi-industrial tests), a technology was developed for the protection of dredging polygons from seasonal freezing by flooding using chemical reagents and polymer films. Technological schemes for the protection of rocks from freezing by flooding with the use of chemical colmatage and shielding of dams by polymer films have been developed. As a result of the conducted studies, the necessary tooth and sink sizes for the specific conditions of the deposits, as well as the reagent consumption rates, have been established, which vary within the range of  $0.5 - 3.0 \text{ kg/m}^2$  depending on the granulometric composition of the rocks. Thus, by carrying out comparatively cheap and low-labor-intensive measures, it is possible to solve the problem of protecting the rocks of dredging polygons from freezing by flooding. Thus, provided that other works are successfully carried out (repair of the dredge, etc.), early start-up of the dredge, high-performance work during the washing season, late stop at a pre-planned and prepared place can be done. Due to this, we can achieve a significant increase in seasonal productivity and a decrease in the unit cost of mining  $1 \text{ m}^3$  of rock mass or a unit of metal.

**Keywords:** permafrost, seasonal permafrost, placer, sands, defrost, frost protection, filtration, anti-filtration screens, films, chemical reagents, tooth, draining

## References

1. Glebov V. D., Lysenko V. P. Konstruirovaniye plenochnykh protivofil'tratsionnykh elementov v plotinakh i peremychkakh // *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 1973. № 5. С. 33–35.
2. Gol'dtman V. G., Znamenskii V. V., Chistopol'skii S. D. *Gidravlichesкое ottaivaniye merzlykh gornyykh porod*. Magadan: Trudy VNII-1, 1970. T. 3. 450 s.
3. Emel'yanov U. G. *Primeneniye khlorigo natriya dlya predokhraneniya gruntov ot zamerzaniya // Podgotovka merzlykh gruntov dlya ustroystva fundamentov: sb. nauch. tr. M.: Stroiizdat, 1968.*
4. Kostovetskii V. P. *Gornoe proizvodstvo i // Tr. GIGKhS. M., 1981. Vyp. 53.*
5. Kostromin M. V., Pozlutko S. G. *Povysheniye effektivnosti razrabotki tekhnogennykh i prirodnotekhnogennykh rossypei // Gornyi zhurnal. 1996. № 9–10. S. 17–21.*
6. Kostromin M. V. *Predokhraneniye drazhnykh poligonov ot promerzaniya s ispol'zovaniem plotin // Nedra Vostoka. 1993. S. 34–37.*
7. Leshkov V. G. *Teoriya i praktika razrabotki rossypei mnogocherpakovymi dragami. M.: Nedra, 1980. 352 s.*
8. Natotsinskii V. I. *Podgotovitel'nye raboty pri razrabotke rossypnykh mestorozhdenii. M.: Nedra, 1975. 168 s.*
9. Stafeev P. F. *Glubokoe rykhleniye drazhnykh poligonov // Kolyma. 1966. № 6.*
10. Potemkin S. V. *Ottaika merzlykh porod. M.: Nedra, 1991. 160 s.*
11. Priimak A. I. *Izuchenie primenyaemosti penoplastov dlya predokhraneniya gruntov ot sezonnogo promerzaniya. Magadan: Trudy VNII-1, 1966. T-25.*
12. Pyatakov V. G. *Nauchno-metodicheskoe obosnovaniye intensivifikatsii protsessov drazhnykh razrabotok mnogoletnemerzlykh rossypnykh mestorozhdenii neglubokogo zaleganiya: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 1994. 39 s.*
13. Pyatakov V. G., Levinskii B. V., Vedyayev Yu. M. *Sovershenstvovaniye sposoba predokhraneniya porod ot sezonnogo promerzaniya penistymi pokrytiyami // Razrabotka rudnykh i rossypnykh mestorozhdenii. Irkutsk: Irgiredmet, 1973. S. 71–80.*
14. *Razmorazhivaniye gruntov s primeneniem rastvora khlorigo natriya / V. I. Bui [i dr.] // Obogashcheniye peska i razmorazhivaniye gruntov. M.: Stroiizdat, 1996.*
15. Rashkin A. V., Shuvalov N. G. *Issledovaniye tamponazhnykh rastvorov na osnove natriikarboksiltellyulozy // Kolyma. 1971. № 1. S. 14–16.*
16. Stafeev P. F. *Dragirovaniye zabaikal'skikh rossypei. Irkutsk: Vost.-Sib. izd-vo, 1974. 12 s.*
17. Stafeev P.F. *O teplotekhnicheskome effekte plenochnykh pokrovov pri ottaivanii merzlykh porod // Kolyma. 1970. № 70.*
18. Trupak N. *Stroitel'stvo zemlyanykh plotin na vechnomerzlykh gruntakh // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. 1970. № 9. S. 8–11.*
19. Shorokhov S. M. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya razrabotki rossypnykh mestorozhdenii. M.: Nedra, 1973. 795 s.*
20. *Effektivnost' primeneniya plenochnykh pokrovov dlya ottaivaniya merzlykh gruntov / R. N. Novosel'skii [i dr.] // Kolyma. 1969. № 6.*
21. Hans J. B. *Use of salt in clay core aids winter dam building // Engineering New-Record. 1953. No. 6.*
22. Shuman Horst. *Mabnahmen in Tegebauvorfeld und an den Baggerborschungen zur Verbesserung der Winterarbeit im Braunkohlenbergban // Neue Bergbautechnik. 1973. No. 11. P. 801–807.*

*Received: June 05, 2017; accepted for publication June 17, 2017*

**Reference to article**

*Kostromin M. V., Panina T. Yu.* Geocryological Problems and Their Solutions in the Development of Placer Deposits // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. No. 4. PP. 59–72. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-59-72.



УДК 622.272

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-73-79

*Геннадий Георгиевич Пирогов,  
доктор технических наук, профессор,  
Забайкальский государственный университет  
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),  
e-mail: pirogov.chita@mail.ru*

### **Принципы вскрытия рудных месторождений при разработке на базе подземных горно-обогатительных комплексов**

Решение задач вскрытия при разработке рудных месторождений подземными горно-обогатительными комплексами (ПГОК) должно основываться на следующих принципах: полная закладка всех выработанных пространств; рудник и подземный обогатительный комплекс располагаются в едином подземном пространстве; рудник и подземный обогатительный комплекс связаны между собой подземными горными выработками; транспортирование руды от ствола шахты до обогатительного комплекса производится по полевым откаточным штрекам; закладочный комплекс приготовления закладочных смесей на основе хвостов подземного обогащения размещается выше самого верхнего горизонта рудника; на земную поверхность осуществляется подъём концентрата. Предложена обобщённая принципиальная схема вскрытия и освоения месторождения ПГОК.

**Ключевые слова:** вскрытие месторождения, подземный обогатительный комплекс, рудник, закладочный комплекс, транспортно-вентиляционные выработки, подземное пространство, освоение месторождения

**Актуальность.** Одной из перспективных ресурсосберегающих экологичных технологий рассматривают освоение рудных месторождений подземными горно-обогатительными комплексами. Внедрение технологии сдерживается рядом нерешённых проблем, среди которых вскрытие месторождений.

**Предлагаемые решения.** В результате выполненного анализа теории и практики вскрытия крутопадающих рудных месторождений, рудопотоков, грузопотоков при освоении месторождений подземными горно-обогатительными комплексами с размещением обогатительного комплекса в недрах на определённой глубине от земной поверхности нами установлено, что решение задач вскрытия при разработке месторождения на базе подземных ГОК должно основываться на следующих принципах:

- полная закладка всех выработанных пространств, что уменьшает развитие зон сдвига горных пород, следовательно, даёт возможность приближения стволов шахт к месторождению;
- рудник и подземный обогатительный комплекс располагаются в едином подземном пространстве, объединённым общим горным отводом;
- рудник и подземный обогатительный комплекс связаны между собой подземными горными выработками для транспортирования рудной массы до рудоприёмного бункера обогатительного комплекса и хвостов обогащения в закладочный комплекс (рис. 3);

– транспортирование руды от ствола шахты до разгрузочной ямы приёмного бункера обогатительного комплекса производится по полевым откаточным штрекам, проведённым на горизонтах устройства разгрузочных ям;

– закладочный комплекс приготовления закладочных смесей на основе хвостов подземного обогащения размещается выше самого верхнего горизонта рудника для обеспечения самотечной горизонтальной дальности гидротранспорта смесей до места производства закладочных работ;

– на земную поверхность осуществляется подъём концентрата.

А. С. Воронюк по результатам своих исследований по комплексному вскрытию рудных месторождений предложил следующие варианты вскрытия:

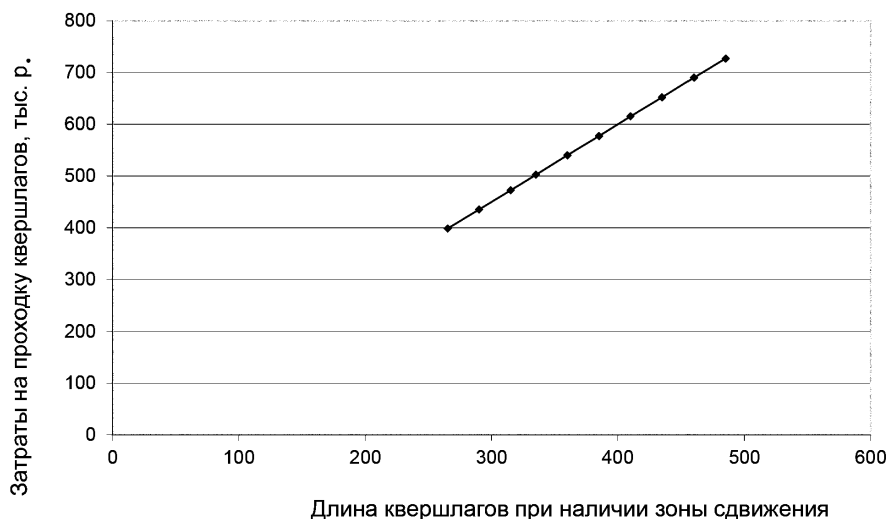
– для крутопадающих месторождений, залегающих на глубине: а) до 500...600 м: вскрытие вертикальным скиповым рудоподъёмным стволом, наклонным съездом для самоходного оборудования и вертикальным вентиляционным стволом; б) более 600 м: вскрытие вертикальным скиповым рудоподъёмным стволом; грузовым стволом, оборудованным кабель-краном, вертикальным вентиляционным стволом;

– для наклонных, пологих и горизонтальных месторождений, залегающих на глубине: а) до 600 м: вскрытие наклонным конвейерным рудовыдачным стволом; наклонным съездом для самоходного оборудования и автотранспорта, вертикальным вентиляционным стволом; б) более 600 м: вскрытие наклонным конвейерным рудовыдачным стволом, грузовым стволом, оборудованным кабель-краном, и вертикальным вентиляционным стволом.

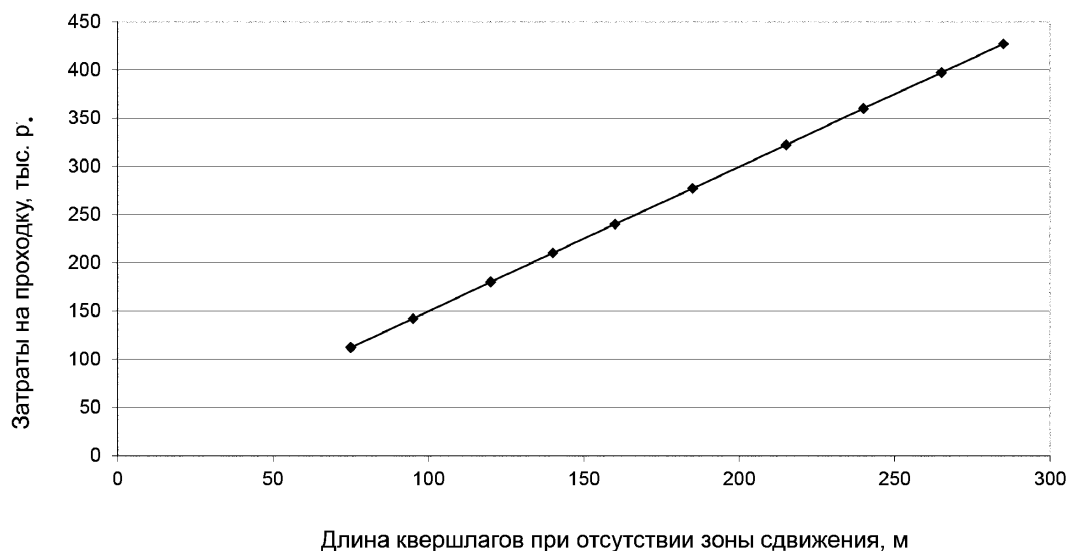
Рудная масса части разрабатываемого месторождения, находящейся выше горизонта рудоприёмного бункера подземного обогатительного комплекса, перепускается до этого горизонта по капитальным рудоспускам, следовательно, исключается из процесса подъёма по стволу шахты. Руду, добываемую из нижней части месторождения, по стволу поднимают до горизонта рудоприёмного бункера и транспортируют от ствола (капитальных рудоспусков в первом случае) по полемому откаточному штреку до разгрузочных ям бункера. Таким образом, высота подъёма руды обуславливается глубиной нижней части месторождения и существенно меньше по сравнению с традиционными схемами подъёма до земной поверхности, что способствует уменьшению затрат и увеличению производительности подъёма.

А. С. Воронюк в приведённых выше вариантах вскрытия крутопадающих месторождений предлагает скиповые рудоподъёмные стволы. Однако при использовании подземного обогатительного комплекса клетевой ствол имеет существенное преимущество в сравнении со скиповым, которое заключается в том, что руду до приёмного бункера комплекса доставляют в одних и тех же шахтных вагонах без перегрузки. При скиповом подъёме возникает необходимость в проходке выработок скипового дробильно-погрузочного комплекса, сооружении загрузочно-разгрузочных устройств. Изложенное не означает выгодность клетевой подъёма руды во всех случаях освоения месторождений подземными горно-обогатительными комплексами. При значительной глубине «нижней» части месторождения (свыше 700...800 м) и большой производственной мощности обогатительного комплекса (свыше 1,5 млн т) скиповой подъём может компенсировать недостатки, отмеченные выше.

Полное заполнение выработанных пространств закладкой способствует сохранению целостности породных массивов при очистной выемке руд, следовательно, предотвращению появления и развития зон сдвижения горных пород. Исключение зон сдвижения позволяет приблизить стволы шахт к месторождению. При этом сокращаются длина квершлагов и затраты на их проходку. По ориентировочным расчётам снижение капитальных затрат на сооружение квершлагов для условий Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторождения может составить 3540 тыс. р. или меньше в 1,97 раза в сравнении с проектными затратами. На рис. 1, 2 приведены зависимости затрат на сооружение квершлагов при наличии и отсутствии зон сдвижения.



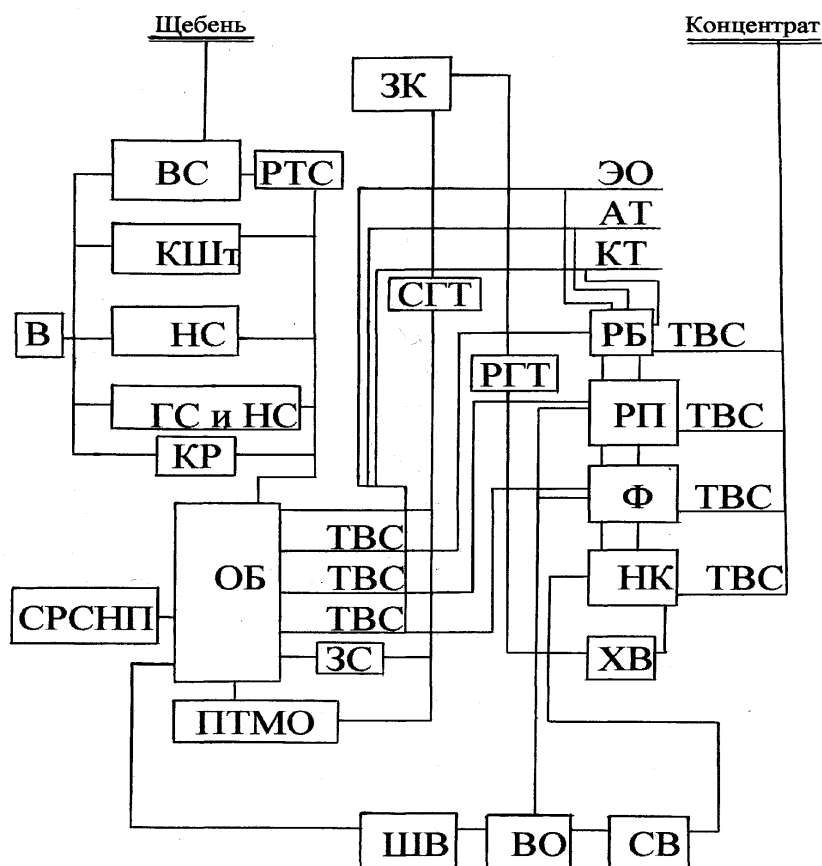
**Рис. 1.** Затраты на сооружение квершлагов при наличии зон сдвижения горных пород  
**Fig. 1.** Costs for the construction of crosscuts in the presence of zones of strata movement



**Рис. 2.** Затраты на сооружение квершлагов при отсутствии зон сдвижения горных пород  
**Fig. 2.** Costs for the construction of crosscuts in the absence of zones of strata movement

Важной для рудника и обогатительного комплекса является задача размещения в системе транспортно-вентиляционных горных выработок закладочного комплекса. Для рудника значимость решения вопроса связана с необходимостью непрерывного приготовления закладочных смесей и транспортирования к местам выполнения закладочных работ с минимальными затратами, для подземного обогатительного комплекса — с непрерывным и экономичным транспортированием твёрдых отходов (хвостов).

Перемещение хвостов обогащения в технологической схеме подземного горно-обогатительного комплекса предлагается осуществлять следующим образом. От зумпфа пульпоперекачной станции накопительной камеры, расположенной на нижнем горизонте обогатительного комплекса, хвосты по полевому штреку и вспомогательному стволу рудника транспортируют напорным гидротранспортом (пнемотранспортом) до закладочного комплекса (рис. 3).



**Рис. 3.** Обобщённая принципиальная схема вскрытия и освоения рудного месторождения подземными горно-обогатительными комплексами:

В – вскрытие; ВС – вертикальный ствол; КШТ – капитальная штольня; НС – наклонный съезд; ГС и НС – грузовой ствол и наклонный съезд (междуэтажный); КР – капитальный рудоспуск (при отработке части месторождения выше горизонта расположения рудоприёмного бункера подземного обогатительного комплекса); ОБ – очистной блок; СРСНП – система разработки сплошной слоевой выемкой наклонных прирезок; ПТМО – подземный техногенный минеральный объект; ЗК – закладочный комплекс; ЭО – электровозная откатка; АТ – автотранспорт; К – конвейерный транспорт; РГТ – напорный рудничный гидротранспорт; СГТ – самотечный гидротранспорт; ТВС – горные выработки транспортно-вентиляционной системы обогатительного комплекса; РБ – рудоприёмный бункер обогатительного комплекса; РП – цех рудоподготовки; Ф – цех флотации; НК – накопительная камера; ХВ – хвосты; ЗС – закладочная смесь; ВО – очистка вод в системе замкнутого водооборота; СВ – сточные воды обогатительного комплекса; ШВ – шахтные воды

**Fig. 3.** Generalized schematic diagram of dissection and development of ore deposits underground mining complexes:

In the autopsy; VS – vertical shaft; Ksht – major tunnel; NS – inclined Congress; the HS and HC – cargo trunk and a sloping exit (interfloor); CU – major ore pass (during the mining part of the deposit above the horizon at rhodopirellula bunker underground enrichment complex); cleaning block; SRNP system development solid layered sloped notch scores; PTMO – underground man-made mineral object; ZK – stowing facility; EO – locomotive haulage; at – transport; – conveyor transport; RGT – pressure mine hydrotransport; SGT – gravity hydraulic transport; fuel assemblies – mining transport-ventilation systems and processing complex; RB – radiopriemnye hopper processing plant; SPM – plant ore preparation; f – flotation plant; NK – collection chamber; XB – tails; ZS – filling mixture; – clean water in the closed water system; SV – waste water processing plant; SWISS – mine water

В горизонтальной плоскости место размещения закладочного комплекса может быть определено по известному методу Л. Д. Шевякова определения мест заложения стволов шахты. Систему неравенств можно представить в следующем виде:

$$\sum V_{\text{прав}} + V^1 > \sum V_{\text{лев}},$$

$$\sum V_{\text{лев}} + V^1 > \sum V_{\text{прав}},$$

где  $V_{\text{прав}}$ ,  $V_{\text{лев}}$  — объёмы выработанных пространств в правой или левой частях месторождения относительно закладочного комплекса;

$V^1$  — сосредоточенный элементарный объём.

Таким образом, место размещения закладочного комплекса в горизонтальной плоскости выбирается вблизи от рудоподъёмного ствола шахты и соответствует минимальной работе гидротранспорта закладочных смесей.

В состав закладочного комплекса включают камеру для установки и последующей эксплуатации грануляторов для производства из хвостов обогащения гранул диаметром 10...15 мм. На рис. 3 представлена обобщённая принципиальная схема вскрытия и освоения рудного месторождения подземными горно-обоганительными комплексами, включающая вскрывающие, транспортные, вентиляционные выработки, связующие рудник и подземный обоганительный комплекс, составные части рудника и плекса.

**Выводы.** Предложенные принципы вскрытия рудных месторождений при их освоении подземными горно-обоганительными комбинатами, а также обобщённая принципиальная схема вскрытия и освоения месторождений могут быть использованы при проектировании горных предприятий.

### Список литературы

1. Каплунов Д. Р. Актуальные проблемы подземной разработки рудных месторождений // Горный журнал. 1995. № 1. С. 46–49.
2. Каплунов Д. Р., Ломоносов Г. Г. Основные проблемы освоения недр при подземной разработке рудных месторождений // Горный журнал. 1999. № 1. С. 42–45.
3. Шварц Ю. Д., Кутузов Д. С., Зицер И. С. Эколого-экономическая эффективность подземных комплексов по добыче и переработке полезных ископаемых // Цветная металлургия. 1994. № 8. С. 3–9.
4. Абрамов В. Ф., Лушников В. И., Саженов А. А. Перспективы применения подземной разработки с предконцентрацией в горных выработках // Материалы Всесоюзной науч.-техн. конф. Алма-Ата, 1986. С. 152–153.
5. Новая технология разработки рудных месторождений подземным способом / Н. С. Ефремовцев [и др.] // Горный журнал. 1985. № 10. С. 35–38.
6. Ломоносов Г. Г., Зейнулин А. А. Основные положения теории и технологии добычи руд с подземной предконцентрацией // Горный информ.-аналитический бюл. 1997. № 1. С. 82–86.
7. Абрамов В. Ф., Лушников В. И., Саженов А. А. Опыт разработки месторождений с подземным обогащением руды на зарубежных рудниках // Цветная металлургия. 1984. № 12. С. 71–72.
8. Безотходное горно-обоганительное производство на базе подземных комплексов / Ю. Д. Шварц [и др.] // Горный журнал. 1992. № 5. С. 42–45.
9. Шварц Ю. Д., Кутузов Д. С., Зицер И. С. Эколого-экономическая эффективность подземных комплексов по добыче и переработке полезных ископаемых // Цветная металлургия. 1994. № 8. С. 3–9.

10. Геологические аспекты создания подземных комплексов по добыче и переработке минерального сырья / Р. И. Семигин [и др.] // Горный журнал. 1995. № 5. С. 31–33.

11. Способ разработки рудных месторождений: пат № 2338879 РФ / Г. Г. Пирогов. Оpubл. 20.11.2008. Бюл. № 32.

*Статья поступила в редакцию 05.06.2017; принята к публикации 17.06.2017*

#### **Библиографическое описание статьи**

*Пирогов Г. Г.* Принципы вскрытия рудных месторождений при разработке на базе подземных горно-обогатительных комплексов // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 73–79. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-73-79.

*Gennady G. Pirogov,*

*Doctor of Engineering Science, Professor,*

*Transbaikal State University*

*(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),*

*e-mail: pirogov.chita@mail.ru*

### **The Principles of Opening Ore Deposits in the Development on the Basis of Underground Mining Complexes**

The task of opening with the development of ore deposits by underground mining and processing complexes (PGOK) should be based on the following principles: complete backfilling of the developed spaces; underground mine and processing plant are located in a common underground space; underground mine and processing complex are connected by underground workings; ore transportation from the mine shaft to the mill complex is on the field haulage drifts; stowing complex of preparation of backfilling mixtures based on tailings underground enrichment is above the upper horizon of the mine; there is a rise of the concentrate on the earth's surface. A generalized schematic diagram of the opening and development of deposits PGOK is given.

**Keywords:** development, underground and processing plant, mine stowing facility, transportation and ventilation of development, underground space, development of the field

#### *References*

1. Kaplunov D. R. Aktual'nye problemy podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii // Gornyi zhurnal. 1995. № 1. S. 46–49.

2. Kaplunov D. R., Lomonosov G. G. Osnovnye problemy osvoeniya nedr pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii // Gornyi zhurnal. 1999. № 1. S. 42–45.

3. Shvarts Yu. D., Kutuzov D. S., Zitser I. S. Ekologo-ekonomicheskaya effektivnost' podzemnykh kompleksov po dobyche i pererabotke poleznykh iskopaemykh // Tsvetnaya metallurgiya. 1994. № 8. S. 3–9.

4. Abramov V. F., Lushnikov V. I., Sazhenov A. A. Perspektivy primeneniya podzemnoi razrabotki s predkontsentratsiei v gornykh vyrabotkakh // Materialy Vsesoyuznoi nauch.-tekhn. konf. Alma-Ata, 1986. S. 152–153.

5. Novaya tekhnologiya razrabotki rudnykh mestorozhdenii podzemnym sposobom / N. S. Efremovtsev [i dr.] // Gornyi zhurnal. 1985. № 10. S. 35–38.

6. Lomonosov G. G., Zeinulin A. A. Osnovnye polozheniya teorii i tekhnologii dobychi rud s podzemnoi predkontsentratsiei // Gornyi inform.-analiticheskii byul. 1997. № 1. S. 82–86.

7. Abramov V. F., Lushnikov V. I., Sazhenev A. A. Opyt razrabotki mestorozhdenii s podzemnym obogashcheniem rudy na zarubezhnykh rudnikakh // Tsvetnaya metallurgiya. 1984. № 12. S. 71–72.
8. Bezotkhodnoe gorno-obogatitel'noe proizvodstvo na baze podzemnykh kompleksov / Yu. D. Shvarts [i dr.] // Gornyi zhurnal. 1992. № 5. S. 42–45.
9. Shvarts Yu. D., Kutuzov D. S., Zitser I. S. Ekologo-ekonomicheskaya effektivnost' podzemnykh kompleksov po dobyche i pererabotke poleznykh iskopaemykh // Tsvetnaya metallurgiya. 1994. № 8. S. 3–9.
10. Geologicheskie aspekty sozdaniya podzemnykh kompleksov po dobyche i pererabotke mineral'nogo syr'ya / R. I. Semigin [i dr.] // Gornyi zhurnal. 1995. № 5. S. 31–33.
11. Sposob razrabotki rudnykh mestorozhdenii: pat № 2338879 RF / G. G. Pirogov. Opubl. 20.11.2008. Byul. № 32.

*Received: June 05, 2017; accepted for publication June 17, 2017*

**Reference to article**

*Pirogov G. G.* The Principles of Opening Ore Deposits in the Development on the Basis of Underground Mining Complexes // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. No. 4. PP. 73–79. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-73-79.

УДК 635-2:632.1

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-80-87

**Николай Петрович Степанов,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Забайкальский государственный университет  
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),  
e-mail: NP-Stepanov@mail.ru

**Галина Михайловна Титова,**  
научный сотрудник,  
Забайкальский институт предпринимательства –  
филиал Сибирского университета потребительской кооперации  
(672000, Россия, г. Чита, ул. Ленинградская, 16)

**Анастасия Сергеевна Лозовская,**  
старший преподаватель,  
Забайкальский институт предпринимательства –  
филиал Сибирского университета потребительской кооперации  
(672000, Россия, г. Чита, ул. Ленинградская, 16),  
e-mail: nastya15.86@mail.ru

**Лилия Эдуардовна Степанова,**  
доцент,  
Забайкальский государственный университет  
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),  
e-mail: SLilya61@mail.ru

### Спектрофотометрическое исследование экстрактов растений *Allium lineare* L и *Allium nutans* L в инфракрасной и видимой областях спектра

Исследованы спектры пропускания экстрактов растений *Allium lineare* L и *Allium nutans* L в диапазонах  $2.27 \div 25$  мкм и  $500 \div 1100$  нм. Обнаружено резонансное увеличение поглощения электромагнитного излучения экстрактами в диапазоне от 650 до 700 нм, которое обусловлено присутствием сульфидов, спектр оптического поглощения которых имеет максимумы при 662 и 669 нм.

**Ключевые слова:** *Allium lineare* L, *Allium nutans* L, спектрофотометрирование, оптическое поглощение, сульфиды

**Введение.** В настоящее время является актуальной задача использования потенциала биологически активных веществ, содержащихся в широко распространённых растениях. Одним из таких растений вполне может стать произрастающий в дикой природе лук душистый. Другие его названия: горный чеснок, лук дикий, дикий чеснок, Сибирский лук, джусай. Это растение, как и все виды лука, относится к семейству лилейных *Liliaceae* (L). В работе [1] он представлен как лук линейный *Allium lineare* L. В отличие от лука линейного, культурный чеснок потерял способность размножаться семенами и известен как чеснок посевной или *Allium sativum* L. В данной работе приводятся также результаты исследования лука поникающего – *Allium nutans* L.

Из литературы, например [2], известно, что луковички чеснока посевного содержат до 0.3 % аллиина, в котором содержится от 65 до 75 процентов серосодержащих соединений. Аллиин, который присутствует во внутриклеточной жидкости, является сравнительно



инертным сульфоксидом и преобразуется в высокорекреационный триосульфат аллицин с помощью C–S лиазного фермента аллииназы, обычно находящейся отдельно от аллицина в вакуолях и сталкивающейся со своим субстратом только при измельчении растения или при появлении патогенных микроорганизмов. Аллицин — смесь летучих ароматических соединений, состоящих из полисульфидов, которая является сильнейшим антиоксидантом, избавляющим клетки от свободных радикалов.

При высоких температурах аллицин разлагается с образованием большого количества соединений серы, концентрация аллицина постепенно уменьшается, и его не обнаруживают после 36 часов хранения при комнатной температуре. При температуре 4 градуса Цельсия аллицин стабилен 2 месяца. Кроме этих веществ в состав чеснока посевного входят: пировиноградная кислота, аммиак, до 0,4 % эфирного масла, представленного смесью аллилпропилсульфида, диаллилдисульфиды, диаллилтрисульфиды и других полисульфидов. Кроме того, в луковичах найдено жирное масло, фитостерины, фитонциды, аскорбиновая кислота, пентозаны, инулин, следы сахара, следы иода, а также азотистые соединения.

Вкус и запах чеснока обусловлены наличием аллиина, аллицина и ряда других органических соединений сульфидной группы (фитонцидов). Помимо противомикробного действия аллицин обладает способностью разрушать раковые клетки. В связи с этим актуальным является создание технологии получения экстрактов, гарантирующей сохранность основных высокомолекулярных соединений, определяющих питательные и целебные качества чеснока посевного. Необходимо отметить, что посевной чеснок может культивироваться на специально подготовленных площадках с использованием широко распространённой сельскохозяйственной техники, что позволяет уйти от необходимости его заготовки в дикой природе, и в короткие сроки нарастить объёмы производства до необходимого уровня.

**Данные о методологии и методике исследования.** Основными биохимическими компонентами семейства лилейных являются органические сульфиды — S-алкилпроизводные цистеина, обуславливающие фармакологическую ценность растения. В многочисленных органических серосодержащих соединениях сера определяется в виде серы элементарной, сероводорода и сульфидов, тиоцианатов, сульфитов, сульфатов и др. Основными способами анализа серосодержащих биологически активных веществ являются следующие методы: высокоэффективная жидкостная хроматография, газовая хроматография, тонкослойная хроматография, капиллярный электрофорез, спектрофотометрия. Из перечисленных методов спектрофотометрический является наиболее предпочтительным, поскольку позволяет при помощи достаточно широко распространённого и простого в обслуживании оборудования обнаружить присутствие серосодержащих соединений и произвести количественную оценку их содержания в экстракте.

В частности, авторы работы [3] при определении серы в растениях проводили минерализацию сырья в присутствии 4 % раствора едкого натра, с последующим исследованием спектров пропускания. В работе [4] при минерализации использовали вместо щелочного раствора едкого натра натрия цинкат. Образующиеся в результате минерализации сульфиды определяли спектрофотометрическим способом по реакции образования окрашенных продуктов с *n*-амино-N, N-диэтиланин сульфатом в присутствии раствора железоммониевых квасцов. Спектр оптического поглощения этих соединений имеет максимумы при 662 и 669 нм. Для количественного определения наличия сульфид-ионов использовали максимум при 669 нм. Чувствительность составляла 5 мкг сульфид-иона в 100 мл спектрофотометрируемого раствора. Авторами работы [4] также отмечено, что закон Ламберта–Бера выполняется в интервале концентраций от 10 до 100 мкг сульфидиона в 1 мл.

В работе [5] описан метод спектрофотометрического количественного определения аллицина и аллиина, а также активности фермента аллииназы с помощью 4-меркаптопиридина в водных извлечениях из долек чеснока. Метод основан на реакции взаимодействия 4 –

меркаптопи-ридина (максимум поглощения которого находится в области 324 нм) с активной дисульфидной связью тиосульфатов (–S–(O)–S–) чеснока и образовании в результате реакции смешанного дисульфида (4-аллилмеркаптопиридина), который не поглощает в этой области.

**Результаты экспериментального исследования.** В данной работе были исследованы спектры пропускания экстрактов *Allium lineare L* и *Allium nutans L* в растительное (подсолнечное) масло в инфракрасном диапазоне спектра. Спектральные зависимости коэффициента поглощения – T, полученные на Фурье спектрометре Shimadzu FTIR-8400S, при температуре 200 °C, в диапазоне от 4400 до 400 см<sup>-1</sup> (2.27 ÷ 25 мкм соответственно), приведены на рис. 1–4.

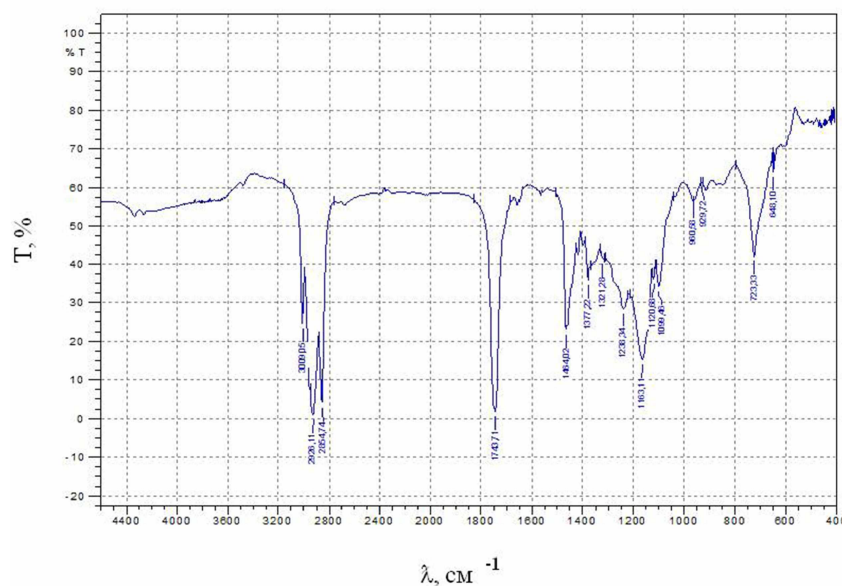


Рис. 1. Спектр поглощения растительного масла  
 Fig. 1. The absorption spectrum of vegetable oil

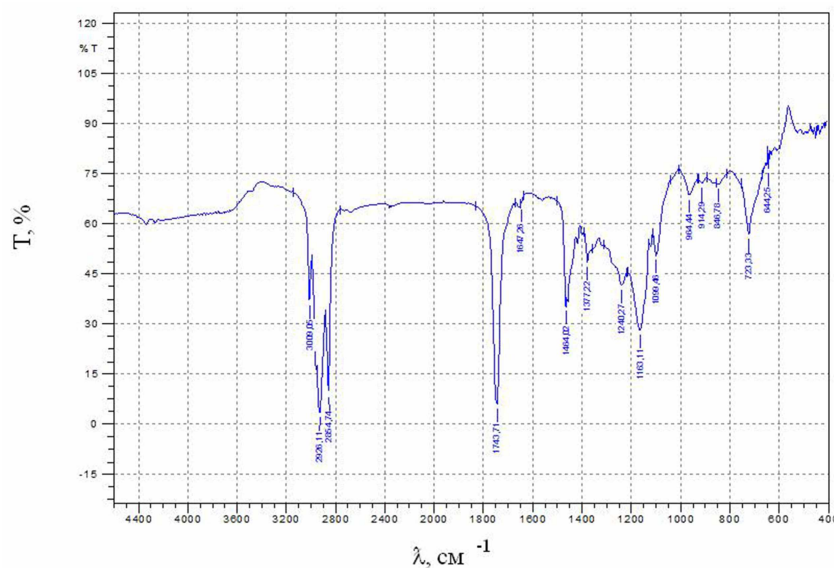
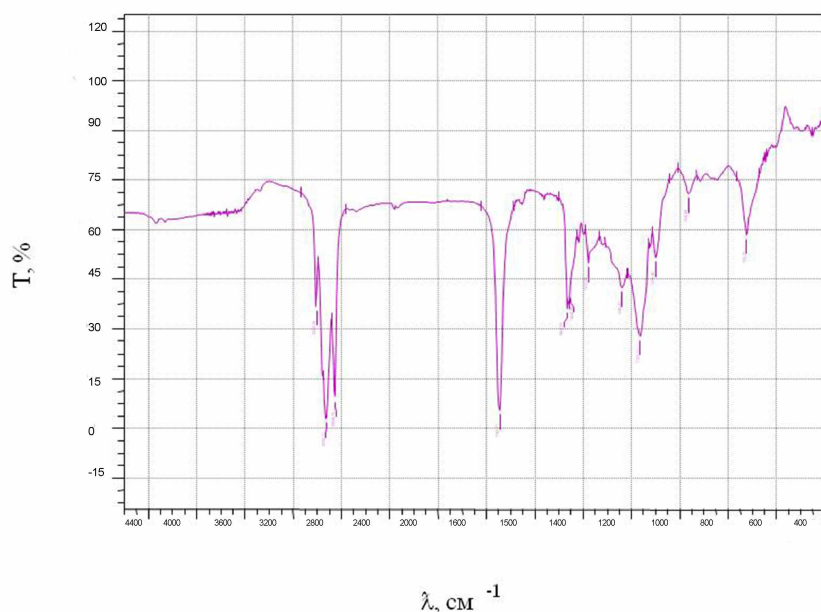
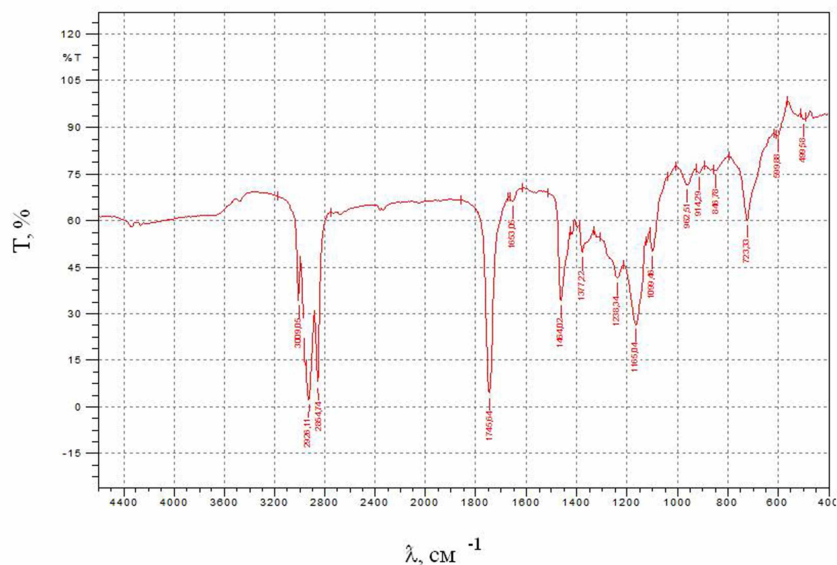


Рис. 2. Спектр поглощения экстракта *Allium lineare L* в растительное масло. Время экстрагирования 15 суток  
 Fig. 2. The absorption spectrum of the extract of *Allium lineare L* in vegetable oil. Extraction time is 15 days



**Рис. 3.** Спектр поглощения экстракта *Allium lineare L* в растительное масло. Время экстрагирования 150 суток

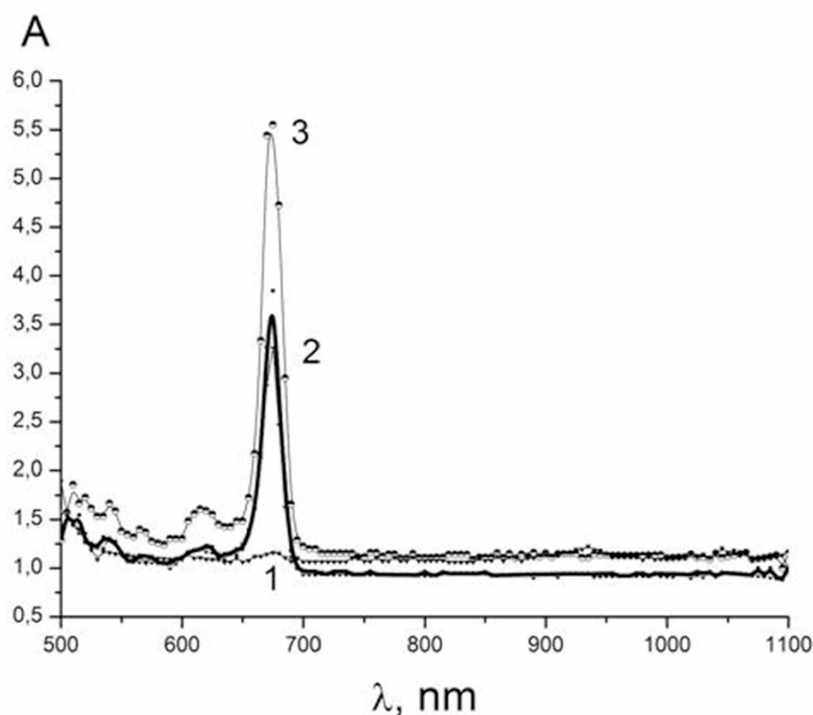
**Fig. 3.** The absorption spectrum of the extract of *Allium lineare L* in vegetable oil. Extraction time is 150 days



**Рис. 4.** Спектр поглощения экстракта *Allium nutans L* в растительное масло. Время экстрагирования 150 суток

**Fig. 4.** The absorption spectrum of the extract of *Allium nutans L* in vegetable oil. Extraction time is 150 days

Как видно из рис. 1–4, в экстрактах не наблюдается дополнительных пиков поглощения электромагнитного излучения, которые свидетельствовали бы о присутствии веществ, входящих в состав *Allium lineare L* и *Allium nutans L*, хотя визуально экстракты отличаются от исходного растительного масла. В связи с этим были получены спектральные зависимости коэффициента поглощения – А экстрактов *Allium lineare L* и *Allium nutans L* в видимой области, которые приведены на рис. 5.



**Рис. 5.** Спектры поглощения: растительного масла — 1; экстракта *Allium lineare L* в растительное масло. Время экстрагирования 15 и 150 суток — 2; экстракта *Allium nutans L* в растительное масло. Время экстрагирования 150 суток — 3

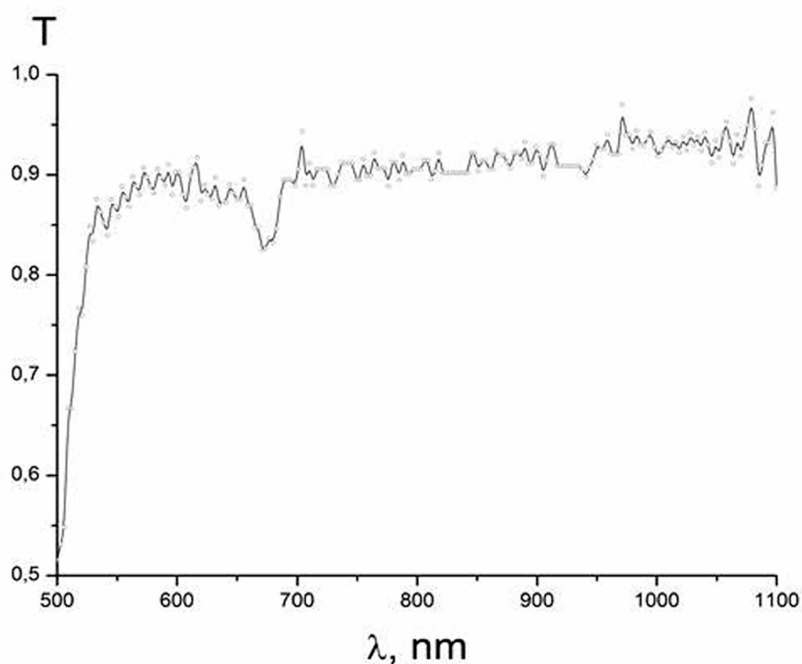
**Fig. 5.** Absorption spectra of: vegetable oil — 1; Extract *Allium lineare L* into vegetable oil. Extraction time 15 and 150 days — 2; Extract of *Allium nutans L* into vegetable oil. Extraction time is 150 days — 3

Коэффициент поглощения регистрировался при помощи спектрофотометра СФ-46 в спектральном диапазоне от 500 до 1100 нм по стандартной методике с использованием кварцевых кювет с толщиной исследуемого слоя вещества 10 мм.

Как видно из рис. 5, наблюдается резонансное увеличение поглощения электромагнитного излучения экстрактами в диапазоне от 650 до 700 нм, которое, исходя из данных, представленных в работе [4], обусловлено присутствием сульфидов, спектр оптического поглощения которых имеет максимумы при 662 и 669 нм. Обращает на себя внимание практически полное совпадение спектров поглощения экстрактов *Allium lineare*, полученных за время 15 и 150 суток, а также в 1.5 раза большая интенсивность поглощения на длине волны 674 нм экстракта *Allium nutans L*, указывающая на гораздо большее количество сульфидов в экстракте.

С целью проверки применимости методики определения сульфид-ионов в экстрактах чеснока, полученных на основе растительного масла при помощи измерения оптического поглощения на длинах волн 650 до 700 нм, был приготовлен экстракт чеснока посевного *Allium sativum L* в растительное масло. Спектр пропускания этого экстракта представлен на рис. 6.

Как видно из рис. 6, в диапазоне длин волн от 650 до 700 нм наблюдается уменьшение пропускания и расщепление минимума с пиками на длинах волн 671 и 678 нм. Необходимо отметить, что интервал между наблюдаемыми пиками поглощения, как и в работе [4], составляет 7 нм. То обстоятельство, что в свежеприготовленных экстрактах просматривается расщепление пика поглощения, а в спектрах экстрактов, представленных на рис. 5, расщепления нет, может быть связано с более длительным временем протекания процесса экстрагирования, и, как следствие, образованием большего количества сульфидов с близкими резонансными частотами.



**Рис. 6.** Спектр пропускания экстракта *Allium sativum L* в растительное масло. Время экстрагирования 30 часов, при температуре 200 °С

**Fig. 6.** The transmission spectrum of the extract of *Allium sativum L* into vegetable oil. Extraction time is 30 hours, at a temperature of 200 °С

**Заключение.** В заключении отметим, что обнаружение интенсивного поглощения электромагнитного излучения исследованными экстрактами в диапазоне длин волн от 650 до 700 нм даёт возможность использовать спектрофотометрические измерения для разработки технологии экстрагирования биологически активных веществ, входящих в состав растений *Allium lineare L* и *Allium nutans L*.

#### Список литературы

1. Черешнин В. Л. Пищевые растения Сибири. Новосибирск: Наука, 1987. 182 с.
2. Телятьев В. В. Целебные клады Восточной Сибири. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1976. 449 с.
3. Ермаков А. И. Определение алкалоидов и гликозидов: методы биохимических исследований. Ленинград: Агропромиздат, 1987. С. 298–351.
4. Косян А. М. Спектрофотометрический метод определения органических сульфидов чеснока // Хим.-фармац. 1985. № 2. С. 1463–1465.
5. A spectrophotometric assay for alliin, alliin and alliinase (alliin ly-ase) with a chromogenic thiol: reaction of 4-mercaptopyridine with thiosulfinates / T. Miron [et al.] // Anal Biochem. 2002. Vol. 307, No. 1. P. 76–83.

*Статья поступила в редакцию 05.07.2017; принята к публикации 29.07.2017*

#### Библиографическое описание статьи

Степанов Н. П., Тутова Г. М., Лозовская А. С., Степанова Л. Э. Спектрофотометрическое исследование экстрактов растений *Allium lineare L* и *Allium nutans L* в инфракрасной и видимой областях спектра // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 80–87. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-80-87.

**Nikolay P. Stepanov,**  
Doctor of Physics and Mathematics, Professor,  
Transbaikal State University  
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),  
e-mail: NP-Stepanov@mail.ru

**Galina M. Titova,**  
Researcher,  
Transbaikal Institute of Entrepreneurship,  
a Branch of the Siberian University of Consumer Cooperation  
(16 Leningradskaya st., Chita, 672000, Russia)

**Anastasia S. Lozovskaya,**  
Senior Teacher,  
Transbaikal Institute of Entrepreneurship,  
a Branch of the Siberian University of Consumer Cooperation  
(16 Leningradskaya st., Chita, 672000, Russia),  
e-mail: nastya15.86@mail.ru

**Liliya E. Stepanova,**  
Associate Professor,  
Transbaikal State University  
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),  
e-mail: SLilya61@mail.ru

### **Spectrophotometric Examination of Extracts of Plants *Allium lineare* L and *Allium nutans* L in the Infrared and Visible Areas of the Spectrum**

The transmission spectra of *Allium lineare* L and *Allium nutans* L extracts in the ranges of  $2.27 \div 25 \mu\text{m}$  and  $500 \div 1100 \text{ nm}$  were studied. A resonant increase in the absorption of electromagnetic radiation by extracts in the range from 650 to 700 nm was observed, which is due to the presence of sulfides which optical absorption spectrum has peaks at 662 and 669 nm.

**Keywords:** *Allium lineare* L, *Allium nutans* L, spectrophotometry, optical absorption, sulphides

### **References**

1. Cherepnin V. L. Pishchevye rasteniya Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1987. 182 s.
2. Telyat'ev V. V. Tselebnye klady Vostochnoi Sibiri. Irkutsk: Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izd-vo, 1976. 449 s.
3. Ermakov A. I. Opredelenie alkaloidov i glikozidov: metody biokhimicheskikh issledovani. Leningrad: Agropromizdat, 1987. S. 298–351.
4. Kosyan A. M. Spektrofotometricheskii metod opredeleniya organicheskikh sul'fidov chesnoka // Khim.-farmats. 1985. № 2. S. 1463–1465.
5. A spectrophotometric assay for alliin, alliin and alliinase (alliin lyase) with a chromogenic thiol: reaction of 4-mercaptopyridine with thiosulfinates / T.Miron [et al.] // Anal Biochem. 2002. Vol. 307, No. 1. P. 76–83.

*Received: July 05, 2017; accepted for publication July 29, 2017*

**Reference to article**

*Stepanov N. P., Titova G. M., Lozovskaya A. S., Stepanova L. E.* Spectrophotometric Examination of Extracts Plants *Allium lineare L* and *Allium nutans L* in the Infrared and Visible Areas of the Spectrum // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No. 4. P. 80–87. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-80-87.

УДК 537.226

DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-88-96

**Сергей Васильевич Цыренжапов,**

*младший научный сотрудник,*

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН*

*(672000, Россия, г. Чита, ул. Бутина, 26),*

*e-mail: lgc255@mail.ru*

**Георгий Степанович Бордонский,**

*доктор физико-математических наук, профессор,*

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН*

*(672000, Россия, г. Чита, ул. Бутина, 26),*

*e-mail: lgc255@mail.ru*

**Николай Петрович Сигачёв,**

*доктор технических наук, профессор,*

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН*

*(672000, Россия, г. Чита, ул. Бутина, 26),*

*e-mail: snp.zab@mail.ru*

### **Использование микроволновых, электрических и тепловых измерений для изучения фазового состояния воды в нанопористых средах**

В работе представлены методики измерений фазовых переходов в пористых средах с наноразмерными порами. Наряду с тепловыми измерениями предложено измерять электрические потенциалы и мощность микроволнового излучения, проходящего через исследуемые образцы. Микроволновое излучение чувствительно к фазовым переходам вода – лёд из-за существенного различия коэффициента поглощения в жидкости и льде. При использовании электродов из химически одинаковых металлов электрические потенциалы позволяют определить неоднородности в среде и переходы через точку перколяции. Резкое изменение потенциалов соответствует исчезновению сквозной проводимости среды. Представлены примеры эффективности предлагаемых методик при температурных измерениях увлажнённых нанопористых образцов. При одновременном использовании трёх методик возможно получение достаточно полной информации о фазовых переходах воды в разнообразных природных и искусственных средах.

**Ключевые слова:** фазовый переход, лёд, микроволновое излучение, электрические потенциалы, термометрия, нанопористые среды

**Введение.** Как известно, электромагнитные методы позволяют исследовать разнообразные объекты без их разрушения. Используя разные участки спектра от нулевой частоты до микроволновой области, можно получать, например, информацию о состоянии воды в объёме дисперсных сред [12]. В частности, в работах [1; 3] была показана эффективность изучения фазового состояния воды в криогелях в процессе их формирования при циклическом охлаждении и нагревании в интервале температур  $-100 \dots +20^\circ\text{C}$  при просвечивании образцов в микроволновом диапазоне. На более низких частотах широко используются методы диэлектрической и импедансной спектроскопии [8; 9], позволяющие также определять фазовые переходы и физико-химические особенности дисперсных сред. Частным случаем



импедансной спектроскопии является измерение проводимости образцов на постоянном токе. Можно выделить специальный случай измерений с использованием собственных квазистационарных потенциалов, применяемый в геофизике [6]. Так, в исследовании [2] впервые была показана принципиальная возможность измерения собственных квазистационарных электрических потенциалов во льду с использованием электродов из одинаковых металлов. Однако этот метод остался неразработанным, так как, на первый взгляд, потенциалы в такой схеме измерений (для одинаковых электродов в изотропной и однородной среде) не должны были возникать.

Цель работы – исследовать возможности использования микроволновых, электрических и тепловых измерений при их сочетании или при одновременном использовании. Под тепловыми измерениями подразумевается термометрия объекта при различных режимах изменения температуры (при охлаждении или нагревании). Рассматриваются увлажнённые дисперсные среды в интервале температур от  $-70^\circ\text{C}$  до  $+30^\circ\text{C}$ , характерном для условий вблизи земной поверхности.

### Теория методов.

1. *Микроволновые измерения.* Микроволновые измерения основаны на поглощении излучения в среде с различными компонентами, имеющими коэффициент затухания по интенсивности  $\alpha$ , определяемый из уравнения переноса электромагнитного излучения

$$I = I_0 e^{-\alpha z},$$

где  $I$  – интенсивность излучения в зависимости от расстояния  $z$ , прошедшего в среде электромагнитной волной,  $I_0$  – начальное значение интенсивности.  $\alpha$  – определяется комплексной относительной диэлектрической проницаемостью среды ( $\hat{\epsilon}$ ).

Если среда состоит из различных компонент, например, из двух, то при использовании приближения для эффективной диэлектрической проницаемости ( $\hat{\epsilon}_{ef}$ ) на основе рефракционной формулы [12]

$$\sqrt{\hat{\epsilon}_{ef}} = \sqrt{\hat{\epsilon}_1} V_1 + \sqrt{\hat{\epsilon}_2} (1 - V_1),$$

где  $\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2$  – соответствующие двум компонентам дисперсной среды значения комплексной диэлектрической проницаемости,  $V_1$  – объёмная доля первого компонента. Имеем для  $I$

$$I = I_0 e^{-(\alpha_1 + \alpha_2)z}.$$

В общем случае среды из  $N$  компонент

$$I = I_0 e^{-(\sum \alpha_N)z};$$

$$\sqrt{\hat{\epsilon}} = \sum_N \sqrt{\hat{\epsilon}_N} V_N.$$

Для случая воды, находящейся в порах диэлектрика, свойства которого не зависят от температуры ( $T$ ) (например,  $\alpha_1$ ), из измерений можно найти  $\alpha_2(T)$  для воды, а, следовательно, и диэлектрическую проницаемость  $\hat{\epsilon}_2$ , зависящую от температуры по формулам:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} \kappa, \quad \kappa = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon'},$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве,  $\kappa$  – мнимая часть коэффициента преломления,  $\epsilon', \epsilon''$  – действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости. При фазовых превращениях воды в дисперсной среде  $\hat{\epsilon}_2$  изменяется, что позволяет определить её состояние в том или ином объекте.

2. *Измерения электрических потенциалов в среде.* При помещении в исследуемый объ-

ект двух электродов из различных металлов между ними возникает электродвижущая сила (ЭДС), определяемая разностью химических потенциалов среды и металлов. В случае использования химически одинаковых материалов такая ЭДС не должна возникать из-за симметрии электрической цепи. Однако в [2] при использовании одинаковых электродов при исследовании льдов, легированных  $HF$ ;  $NH_3$ ;  $NaCl$  наблюдали ЭДС  $\sim 0,1 \div 0,3$  В и её уменьшение при понижении температуры. Обнаружено различие ЭДС для разных легирующих веществ и её гистерезис при циклическом изменении температуры. Причём наблюдали более резкое изменение ЭДС вблизи эвтектической температуры для  $NaCl$ .

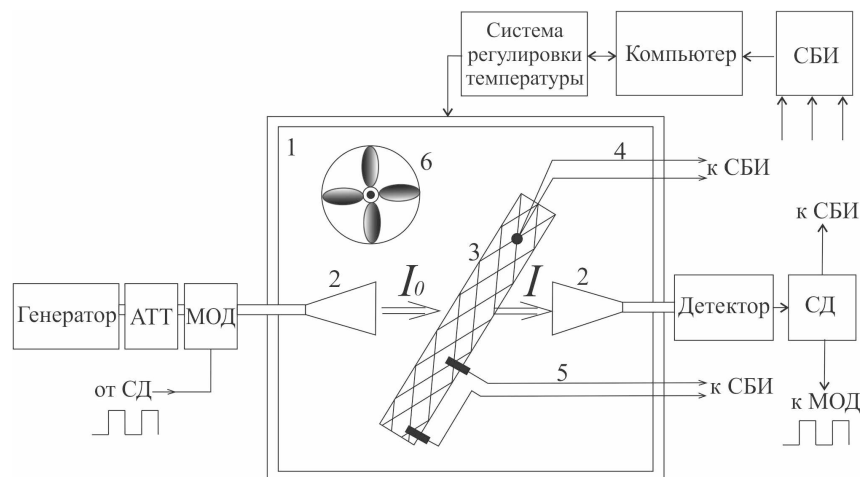
Объяснение эффекта может быть связано с тем, что в среде возникают неоднородные механические напряжения, для случая изменения температуры мёрзлых структур. При этом ЭДС может возникать из-за «псевдопьезоэффекта» [11] и акустоэлектрического эффекта [4]. ЭДС исчезает в случае исчезновения сквозной проводимости, т.е. при переходе через точку перколяции [5; 7]. В наибольшей степени эти эффекты будут проявляться при фазовых переходах воды из-за образования или таяния её кристаллов. Следовательно, эффект можно использовать для регистрации фазовых переходов. Знак эффекта может изменяться в случае скачков градиентов температуры в среде вблизи электродов.

3. *Термометрия образцов.* Термометрия образцов при постоянной скорости изменения температуры в тепловой камере позволяет определить температуру фазового перехода вода – лёд, т. к. выделение или поглощение тепла приводит к изменению тангенса угла наклона касательной к графику измеряемой величины от времени. Кроме того, определяется переохлаждение воды, проявляющееся в виде «петель» на графиках температуры от времени для режима охлаждения среды. Для размытого фазового перехода наблюдается слабовыраженное изменение тангенса угла наклона касательной к графикам (производной температуры по времени  $\partial T/\partial t$ ).

#### ***Экспериментальная установка и измерения.***

*Установка.* Общие теоретические представления использованы при разработке конкретной установки для измерений на небольших образцах из нанопористых сред. Схема установки представлена на рис. 1.

В установке в качестве источника излучения используется маломощный генератор микроволнового излучения, мощностью 1–10 мВт, на частоты от 10 ГГц до 50 ГГц. Выбор частоты измерения определяется задачей и толщиной образца. Для образцов с большим затуханием используются менее высокие частоты. Атенюатор (АТТ) используется для регулировки мощности излучения, что необходимо для установки оптимальных параметров измерений. В качестве приёмника излучения используют детекторные головки с усилением сигнала и последующим синхронным детектированием. Для этой цели излучение генератора модулируется с использованием модулятора (МОД), управляемого сигналом от синхронного детектора. В данном варианте в качестве тепловой камеры использовали климатическую камеру Еспес с диапазоном температур  $+100 \dots -65$  °С. Камеру подключали к системе регулировки её температуры, объединённой с компьютером, для задания изменения температуры во времени. Такая система позволяла проводить непрерывные измерения с любым заданием температуры внутри камеры на протяжении в несколько суток.



**Рис. 1.** 1 – тепловая камера с регулируемой температурой; 2 – рупорные антенны; 3 – исследуемый образец; 4 – термопара „ $T^{\circ}$ “; 5 – электроды для измерения потенциалов; 6 – вентилятор, АТТ – аттенуатор, МОД – модулятор,  $I_0$ ,  $I$  – интенсивности микроволнового излучения на входе и выходе через образец, СД – синхронный детектор, СБИ – система сбора информации

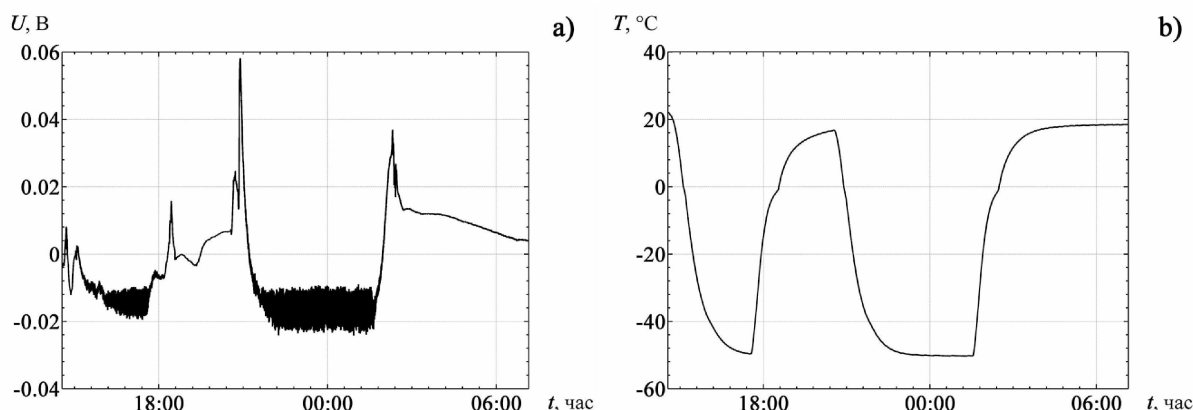
**Fig. 1.** 1 – thermal camera with adjustable temperature; 2 – horn antenna; 3 – investigated sample; 4 – thermocouple „ $T^{\circ}$ “; 5 – electrodes for measuring potentials; 6 – fan, АТТ – attenuator, MOD – modulator,  $I_0$ ,  $I$  is the intensity of microwave radiation input and output through the sample, SD – synchronous detector, SBI – system information gathering

При измерении электрических потенциалов использовали химически инертные позолоченные металлические электроды различной формы (штыревые, плоские пластины). Исследование по вышеизложенным методикам было выполнено для различных материалов, один из них был изготовлен из цементно-песчаной смеси. Его размеры – диаметр 7 см, высота 6 см. В эксперименте использовали генератор на частоту 37 ГГц (длина волны в свободном пространстве 8,1 мм). При помощи СБИ сигналы с образца измеряли со скоростью 1 измерение в секунду. Изменение температуры задавалось от +20 до  $-50^{\circ}\text{C}$ . Нагрев и охлаждение образца занимало от 1 до 3 часов в различных циклах изменения температуры. Опытные образцы из цементно-песчаной смеси формировали в течение 30 суток, перед помещением в измерительную установку их выдерживали в воде в течение 48 часов.

**Измерения.** Для апробирования предложенных методик были выполнены измерения по определению фазового состояния воды в образцах из цементно-песчаной смеси и порошка силикатного материала SBA-15, имеющего наноразмерные поры, и используемого в качестве сорбента. Фазовые переходы воды наиболее выражены при отрицательных температурах, для них ожидали существенных изменений сигналов датчиков. Камера Espes позволяла получить охлаждение до  $-65^{\circ}\text{C}$ . Для дополнительного охлаждения в некоторых экспериментах использовали другую камеру с охлаждением образца жидким азотом. Это связано с тем, что в порах размерами порядка 1 нм вода замерзает по имеющимся данным при температуре около  $-100^{\circ}\text{C}$ , поэтому требуется более глубокое охлаждение образцов с такими порами.

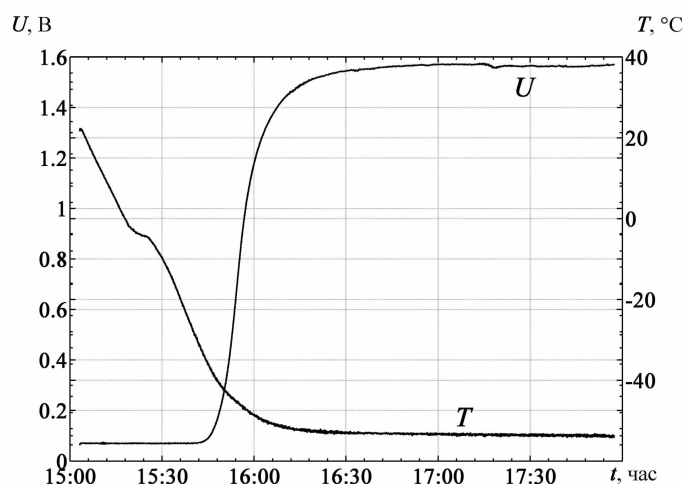
**Температурные исследования образца из цементно-песчаной смеси.** На рис. 2 приведены результаты измерений температуры внутри образца на глубине 2 см от поверхности и одновременного измерения разности потенциалов на измерительных электродах.

Результаты измерений проходящей мощности излучения и температуры образца при его охлаждении представлены на рис. 3.



**Рис. 2.** а) изменение разности потенциалов ( $U$ ) на электродах в зависимости от времени; б) зависимость температуры образца от времени при циклическом линейном изменении температуры воздуха внутри камеры

**Fig. 2.** a) the change in the potential difference ( $U$ ) on the electrodes depending on time; b) dependence of sample temperature on time at a cyclic linear temperature change of the air within the chamber



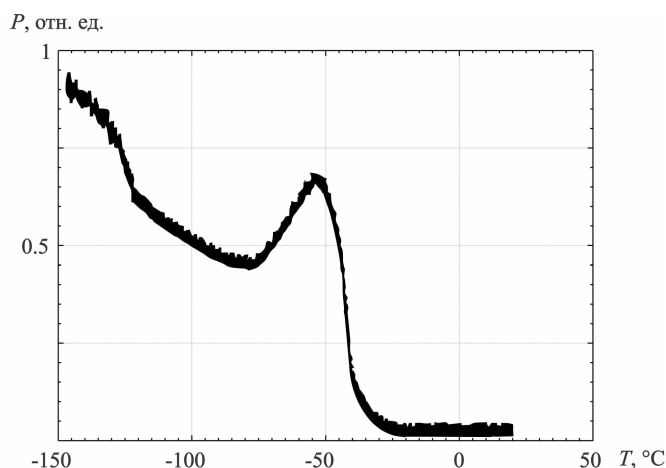
**Рис. 3.** Зависимость проходящей мощности микроволнового излучения на частоте 37 ГГц (в единицах напряжения на выходе прибора) и температуры образца из цементно-песчаной смеси от времени при его охлаждении

**Fig. 3.** The dependence of the power passing microwave radiation at a frequency of 37 GHz (in units of the output voltage of the device) and the temperature of the sample from cement-sand mixture from the time when it cools

На рис. 4 приведены результаты измерений проходящей мощности излучения на частоте 94 ГГц через силикатный материал SBA-15 в процессе охлаждения среды. Данный материал имеет гексагонально упорядочные в сечении цилиндрические поры – средний диаметр цилиндрических пор 10,8 нм, кроме них имелись поры с диаметром  $\sim 2$  нм. Весовая влажность образца  $\sim 120\%$ .

Как было установлено в экспериментах, измерение микроволнового затухания в образцах, имеющих жидкие наноразмерные включения ( $\sim 1-15$  нм), позволяют определять фазовые превращения воды при охлаждении среды. Эти превращения определяются по изменению проходящей мощности излучения. Фазовые переходы воды в более крупных порах имеют резкий отклик при измерениях, они могут быть также зарегистрированы при тепловых и микроволновых измерениях. В случае малого количества воды резкий фазовый переход регистрируется по измерениям собственных электрических потенциалов, что

следует из рис. 2. Однако, в этом случае требуется сквозная проводимость в среде для регистрации потенциалов. Поэтому такой вид измерений эффективен для определения точки перколяции и связанной с ней фазового перехода особого вида (геометрического фазового перехода) [5; 7]. Метод измерения потенциалов позволяет определить некоторые особенности среды по возникновению шумовой ЭДС (рис. 2). Её природа может быть связана с медленными изменениями структуры и миграцией ионов по незамёрзшим плёнкам в объёме образца.



**Рис. 4.** Результаты измерения проходящей мощности (в относительных единицах) микроволнового излучения через образец SBA-15 на частоте 94 ГГц в процессе охлаждения до  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Fig. 4.** The results of measurements of passing power (in relative units) of microwave radiation through the sample SBA-15 at a frequency of 94 GHz in the process of cooling to  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### **Обсуждение результатов.**

##### *Выводы.*

1. В работе показано, что применение микроволновых, электрических и тепловых измерений, особенно при их совместном использовании, позволяет эффективно изучать фазовые превращения воды в дисперсных и пористых средах.

2. Микроволновое излучение наиболее пригодно для исследования нанопористых сред, для которых фазовые переходы могут быть растянуты на некоторый интервал температур.

3. Измерение потенциалов с использованием химически одинаковых электродов позволяет зарегистрировать неоднородности в среде, определяемые механическими напряжениями, вариациями химического состава и особые эффекты, связанные с перколяционными явлениями.

#### **Список литературы**

1. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д., Сигачев Н. П., Щегрина К. А. Изучение свойств криогелей по их микроволновым характеристикам // Конденсированные среды и межфазные границы. 2016. Т. 18, № 3. С. 304–311.

2. Бордонский Г. С., Истомина А. С., Крылов С. Д. Диэлектрическая проницаемость и электрические потенциалы льда с включениями // Конденсированные среды и межфазные границы. 2009. Т. 11, № 3. С. 198–202.

3. Бордонский Г. С., Крылов С. Д. Структурные превращения переохлаждённой воды в нанопорах по данным о поглощении микроволнового излучения // Журнал физической химии. 2012. Т. 86, № 11. С. 1806–1812.

4. Бордонский Г. С., Цыренжапов С. В., Харин Ю. В. Акустоэлектрический эффект в пресном льду // Конденсированные среды и межфазные границы. 2012. Т. 14, № 2. С. 169–174.
5. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: URSS, 2012. 112 с.
6. Федьинский В. В., Тархов А. Г. Электроразведка: справ. геофизика. М.: Недра, 1979. 518 с.
7. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1970. 416 с.
8. Barsukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. N. Y.: Wiley, 2005. 608 p.
9. Fedichev P. O., Menshikov L. I., Bordonskiy G. S., Orlov A. O. Experimental evidence of the ferroelectric nature of the  $\lambda$ -point transition in liquid water // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94, вып. 5–6. Р. 433-437.
10. Komarov V., Wang S., Tang J. Permittivity and measurements // Encyclopedia of RF and Microwave Engineering / edited by K. Chang. J. Wiley & Sons, Inc., 2005. P. 3693–3711.
11. Petrenko V., Whitworth R.W. Physics of Ice. Oxford Univ. Press., 1999. 347 p.
12. Sharkov E.A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, N. Y., London, Paris, Tokyo. Springer / PRAXIS, 2003. 613 p.

*Статья поступила в редакцию 05.05.2017; принята к публикации 15.05.2017*

#### **Библиографическое описание статьи**

*Цыренжапов С. В., Бордонский Г. С., Сизгачёв Н. П. Использование микроволновых, электрических и тепловых измерений для изучения фазового состояния воды в нанопористых средах // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 88–96. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-88-96.*

**Sergey V. Tsyrenzhapov,**  
Junior Researcher, Institute of Natural Resources,  
Ecology and Cryology, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences  
(26 Butina st., Chita, 672000, Russia),  
e-mail: lgc255@mail.ru

**Georgy S. Bordonskiy,**  
Doctor of Physics and Mathematics,  
Chief of the Laboratory of Cryogenesis Geophysics,  
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
(26 Butina st., Chita, 672000, Russia),  
e-mail: lgc255@mail.ru

**Nikolay P. Sigachev,**  
Doctor of Engineering Science, Director,  
Institute of Natural Resources, Ecology  
and Cryology Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences  
(26 Butina st., Chita, 672000, Russia),  
e-mail: snp.zab@mail.ru

### Using Microwave, Electric and Thermal Measurements for Study of the Phase State of Water in Nano-Porous Media

The measurement techniques of phase transitions in nanoporous media are presented. Along with thermal measurements it is offered to measure electric potentials and power of the microwave radiation propagated through the studied specimens. Microwave radiations are sensitive to phase transition of water-ice because of essential distinction of electromagnetic losses in liquid and ice. When using electrodes from chemically identical metals, electric potentials allow us to define inhomogeneities in the media and transitions through a percolation point. Jump of potentials corresponds to disappearance of through conduction of the media. Examples of effectiveness of the offered techniques at temperature measurements of the wet nanoporous specimens are presented. If three techniques are used simultaneously, it is possible to obtain rather complete information on phase transitions of water in various natural and artificial media.

**Keywords:** phase transition, ice, microwave radiation, electric potentials, thermal measurements, nanoporous specimens

### References

1. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Sigachev N. P., Shchegrina K. A. Izuchenie svoystv kriogelei po ikh mikrovolnovym kharakteristikam // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy. 2016. T. 18, № 3. S. 304–311.
2. Bordonskii G. S., Istomin A. S., Krylov S. D. Dielektricheskaya pronitsaemost' i elektricheskie potentsialy l'da s vklyuchenyami // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy. 2009. T.11, № 3. S. 198–202.
3. Bordonskii G. S., Krylov S. D. Strukturnye prevrashcheniya pereokhlazhdennoi vody v nanoporakh po dannym o pogloshchenii mikrovolnovogo izlucheniya // Zhurnal fizicheskoi khimii. 2012. T. 86, № 11. S. 1806–1812.
4. Bordonskii G. S., Tsyrenzhapov S. V., Kharin Yu. V. Akustoelektricheskii effekt v presnom l'du // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy. 2012. T. 14, № 2. S. 169–174.

5. Tarasevich Yu. Yu. Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy. M.: URSS, 2012. 112 c.
6. Fedynskii V. V., Tarkhov A. G. Elektrozvedka: sprav. geofizika. M.: Nedra, 1979. 518 s.
7. Shklovskii B. I., Efros A. L. Elektronnye svoistva legirovannykh poluprovodnikov. M.: Nauka, 1970. 416 s.
8. Barsukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. N. Y.: Wiley, 2005. 608 p.
9. Fedichev P. O., Menshikov L. I., Bordonskiy G. S., Orlov A. O. Experimental evidence of the ferroelectric nature of the  $\lambda$ -point transition in liquid water // Pis'ma v ZhETF. 2011. T. 94, vyp. 5–6. S. 433–437.
10. Komarov V., Wang S., Tang J. Permittivity and measurements // Encyclopedia of RF and Microwave Engineering / edited by K. Chang. J. Wiley & Sons, Inc., 2005. P. 3693–3711.
11. Petrenko V., Whitworth R.W. Physics of Ice. Oxford Univ. Press., 1999. 347 p.
12. Sharkov E.A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, N. Y., London, Paris, Tokyo. Springer / PRAXIS, 2003. 613 p.

*Received: May 05, 2017; accepted for publication May 15, 2017*

**Reference to article**

*Tsyrenzhapov S. V., Bordonskiy G. S., Sigachev N. P. Using Microwave, Electric and Thermal Measurements for Study of the Phase State of Water in Nano-Porous Media // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. No. 4. P. 88–96. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-88-96.*



## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ SCIENTIFIC LIFE

УДК 517.958

### Вселенная таланта профессора Святослава Евгеньевича Холодовского (к 70-летию юбилею)

Известный учёный в России и в зарубежном научном сообществе, доктор физико-математических наук, профессор, любимый студентами многих поколений преподаватель, целеустремлённый и неравнодушный человек, политически активный гражданин своей страны – всё это Святослав Евгеньевич Холодовский, который в этом году отмечает свой юбилей.

Академик Пётр Капица писал, что главный признак таланта – это когда человек знает, чего он хочет. Святослав Евгеньевич живёт и работает по этому принципу. Он столь увлечён жизнью и столь многогранен в ней, что этому, пожалуй, мог бы позавидовать и сам Юлий Цезарь. Целеустремлённый, он всегда живёт согласно продуманной программе действий и всегда добивается поставленных целей.

Мир науки и творчества Святослав Евгеньевич открыл для себя ещё в 1966 году, когда стал студентом Читинского педагогического института. Далее круговорот событий не давал остановиться: служба в армии и стажировка в Московском областном пединституте, обучение в аспирантуре в этом же вузе (МОПИ) под руководством доктора физико-математических наук, профессора Ольги Владимировны Голубевой. В 1979 году – защита кандидатской диссертации «Задачи фильтрации со свободной поверхностью в неоднородных средах и методы их решения» в Новосибирском институте гидродинамики СО АН СССР.

Наука для С. Е. Холодовского – главное. Его докторская диссертация «Развитие метода потенциала в решении проблем фильтрации жидкости в сильно неоднородных средах» была успешно защищена в 1999 году в МГУ под председательством академика РАН Горимира Горимировича Чёрного. «В первую очередь он – математик», – говорят о нём коллеги.



*Святослав Евгеньевич  
Холодовский,*

доктор физико-математических наук,  
профессор

*Svyatoslav Evgen'evich  
Kholodovskii,*

Doctor of Physical and Mathematical  
Sciences, Professor

Начиная с 2000 года юбиляром опубликовано 53 научных работы, значимых для российской и зарубежной науки. Материалы размещены в ведущих научных журналах, 9 научных работ выпущены издательством Российской академии наук.

Святослав Евгеньевич разработал новое научное направление в решении неклассических задач математической физики в областях, содержащих плёнки внутри и на границе. Данное научное направление имеет несомненный практический интерес в актуальных нанотехнологиях, при разработке композитных материалов, в задачах экранирования загрязнённых зон, теплоизоляции зданий и т. д. Кропотливый труд учёного позволил ему построить математическую модель различных динамических процессов в областях с плёнками. Были выведены граничные условия на многослойных плёнках, в которых порядок производных от искомой функции может быть выше порядка производных в уравнении, что выходит за рамки классической теории.

С. Е. Холодовский ввёл в научный оборот и обосновал «метод свёртывания разложений Фурье», который позволяет строить явные решения задач с плёнками: выведены формулы, выражающие решения задач с плёнками через известные решения аналогичных задач без плёнок. Разработанный учёным метод универсален, так как позволяет, в том числе, решать задачи о колебании объектов с точечными массами, упругими контактами областей и т. д.

Математика, как и педагогический талант, у Святослава Евгеньевича в крови. Он достойный наследник своего отца Евгения Петровича Холодовского, отличника народного просвещения РСФСР, проработавшего на кафедре математики Читинского государственного педагогического института с первых лет его основания. Евгений Петрович – организатор и директор школы юных математиков при ЧГПИ, инициатор проведения областных математических олимпиад для школьников. Успешный и талантливый сын, Святослав Евгеньевич, за 43 года работы на кафедре достиг многого. Он руководит лабораторией прикладной математики, аспирантурой по специальности 01.02.05 *Механика жидкости, газа и плазмы*, магистерскими диссертациями и дипломными работами студентов, которые всегда успешно проходят процедуру защиты. Любовь аспирантов и студентов к своему преподавателю небезосновательна – Святослав Евгеньевич на занятиях применяет проблемный метод обучения и уделяет особое внимание индивидуальной работе со слушателями.

Но наука и педагогика – слишком малое пространство для реализации желаний и возможностей увлечённого и креативного человека. Серьёзный, собранный и ответственный учёный-математик – это ещё и лирик: певец и художник.

Святослав Евгеньевич с удовольствием участвует в общественной жизни города и университета, устраивает выставки своих акварельных пейзажей, исполняет романсы на концертах и конкурсах художественной самодеятельности. Так, в 2013 году в телевизионном конкурсе ТК «Альтес» «Знай наших!» он покорила жюри романсом «О, если б мог выразить в звуке», исполненным в лучших традициях этого музыкального жанра.

Однако наш герой не только физик и лирик, он ещё и спортсмен. В юности он занимался тяжёлой атлетикой, потом стал заядлым туристом и увлекся плаванием.

Внутренний мир Святослава Евгеньевича – это целая Вселенная, в которой сконцентрирована научная мысль, энергия жизни, творческое начало, сила духа спортсмена и неиссякаемая уверенность в том, что новые идеи обязательно найдут воплощение в жизни и сделают её ещё более интересной и яркой.

**Коллектив редакции научного журнала**

## Список наиболее значимых работ С. Е. Холодовского

1. Холодовский С. Е. О фильтрационных течениях в средах с экранированным шаровым включением // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 4. С. 98–104.
2. Холодовский А. С., Холодовский С. Е. О разложении функций в квазиинтегралы Фурье и их приложения к решению краевых задач // Дифференц. уравнения. 2004. Т. 40, № 10. С. 1412–1416.
3. Холодовский С. Е. Метод свёртывания разложений Фурье в решении краевых задач с пересекающимися линиями сопряжения // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2007. Т. 47, № 9. С. 1550–1556.
4. Холодовский С. Е. Метод рядов Фурье для решения задач в кусочно-неоднородных средах с прямолинейной трещиной (завесой) // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2008. Т. 48, № 7. С. 1209–1213.
5. Холодовский С. Е. Метод свёртывания разложений Фурье. Случай обобщённых условий сопряжения типа трещины (завесы) в кусочно-неоднородных средах // Дифференц. уравнения. 2009. Т. 45, № 6. С. 855–859.
6. Холодовский С. Е. Метод свёртывания разложений Фурье. Случай трещины (завесы) в неоднородном пространстве // Дифференц. уравнения. 2009. Т. 45, № 8. С. 1204–1208.
7. Холодовский С. Е. О решении краевых задач на кусочно-однородной плоскости с параболической трещиной (завесой) // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2009. Т. 49, № 11. С. 1931–1936.
8. Холодовский С. Е., Гуримская И. А, Игнатъева Н. В. О решении краевых задач на неоднородной плоскости с трещиной и завесой, соединёнными последовательно // Дифференц. уравнения. 2011. Т. 47, № 3. С. 396–404.
9. Холодовский С. Е., Шадрина Н. Н. О решении краевых задач с обобщёнными условиями сопряжения типа трещины (завесы) // Известия вузов. Математика. 2011. № 6. С. 100–106.
10. Холодовский С. Е. О решении краевых задач в полупространстве, ограниченном многослойной плёнкой // Ученые записки ЗабГГПУ. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2011. № 3. С. 160–164.
11. Холодовский С. Е. О решении краевых задач в цилиндрах с многослойным плёночным включением // Ученые записки ЗабГГПУ. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2012. № 3. С. 145–151.
12. Холодовский С. Е., Нутчина-Пестрякова Н. В. О решении краевых задач в цилиндрах, разделённых трёхслойной плёнкой на два полуцилиндра // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2012. Т. 52, № 7. С. 1261–1266.
13. Холодовский С. Е. Решение задачи о движении неограниченной разрывной струны (стержня) с упругим контактом // Ученые записки ЗабГУ. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2013. № 3. С. 132–139.
14. Холодовский С. Е. О решении краевых задач для уравнения Лапласа на плоскости с трёхслойным плёночным включением // Дифференц. уравнения. 2013. Т. 49, № 12. С. 1697–1701.
15. Холодовский С. Е. О решении краевых задач для уравнения Пуассона в плоских областях, ограниченных сильно- и слабопроницаемыми плёнками, соединёнными последовательно // Ученые записки ЗабГУ. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2014. № 3. С. 104–109.
16. Холодовский С. Е. Об эффективном решении задачи о движении неограниченной струны с точечной массой // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2015. Т. 55, № 1. С. 115–122.

17. Холодовский С. Е. Краевые задачи в областях с наноструктурными границами (покрытиями). Теорема двойственности // Ученые записки ЗабГУ. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2015. № 3. С. 130–134.

18. Холодовский С. Е. О многослойных плёнках на границе полупространства // Математические заметки. 2016. Т. 99, Вып. 3. С. 421–427.

19. Холодовский С. Е. Решение краевых задач в цилиндрах с двухслойным плёночным включением // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. 2016. Т. 16, № 3. С. 98–102.

20. Холодовский С. Е. Задачи математической физики в областях с плёночными включениями и плёночными границами. Чита: ЗабГУ, 2017. 234 с.

21. Холодовский С. Е. О решении краевых задач для уравнения Лапласа в шаре, ограниченном многослойной плёнкой // Дифференц. уравнения. 2017. Т. 53, № 7. С. 919–926.

**The Universe of Talent of Professor  
Svyatoslav Evgenievich Kholodovskii (to the 70th Birthday Anniversary)**

A well-known scientist in Russia and in the international scientific community, Doctor of Physics and Mathematics, professor, a lecturer respected by many generations of students, a purposeful and committed person, a politically active citizen of his country – all these words are about Svyatoslav Evgenievich Kholodovskii who celebrates his anniversary this year.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ GUIDELINES FOR AUTHORS

Редакция принимает **не опубликованные** ранее материалы объёмом до 1 п. л. (40 000 знаков с пробелами), выполненные в жанрах:

Жанр	Минимальный объём
статья теоретического и эмпирического характера, содержащая основные научные результаты, полученные автором	0,5 п. л. (20 000 знаков)
научные доклады	0,3 п. л. (12 000 знаков)
научные обзоры рецензии	0,2 п. л. (8 000 знаков)

### В редакцию НЕОБХОДИМО ПРЕДСТАВИТЬ:

1. Электронный вариант статьи. В имени файла указывается фамилия автора и название статьи.
2. Электронный вариант заполненного лицензионного договора.
3. Отзыв научного руководителя с указанием новизны и достоверности исследования, если автор статьи – аспирант.
4. Личная карточка автора – сведения об авторе/авторах.

### СТРУКТУРА СТАТЬИ, ПРЕДСТАВЛЯЕМОЙ В РЕДКОЛЛЕГИЮ ЖУРНАЛА

**Отрасль науки (рубрика журнала)**

**Код: УДК**

**Инициалы, фамилия автора** приводятся на русском и английском языках. Количество соавторов в статье может быть не более 5. При наличии соавторов первым указывается ответственный/основной автор. На русском и английском языках даётся описание вклада в исследование каждого автора (по 1 предложению).

**Город, страна** на русском и английском языках.

**Место работы** (постоянное и при наличии – место выполнения научного проекта) – на русском и английском языках.

**Почтовый адрес** – на русском и английском языках.

**Источники финансирования статьи** (при их наличии) – на русском и английском языках.

**Название статьи** – на русском и английском языках строчными буквами (не заглавными).

**Аннотация:** 150–200 слов на русском и английском языках. Текст аннотации должен включать основные результаты статьи: актуальность, методы, выводы исследования. Аннотация не должна содержать каких-либо ссылок.

**Ключевые слова или словосочетания** (5–7 терминов) отделяются друг от друга запятой. Приводятся на русском и английском языках.

**Основной текст статьи**, содержащий следующие блоки: вводящую часть, данные о методологии и методике исследования, результаты исследования, обсуждение результатов, заключение – выводы. **Название блоков выделяется полужирным шрифтом.**

Статья должна иметь внутритекстовые ссылки на цитируемые источники. Ссылки приводятся в квадратных скобках с указанием порядкового номера в списке литературы и

страницы, например [1, с. 25]. Несколько источников отделяются друг от друга точкой с запятой, например [1; 3; 4].

**Список литературы** указывается в алфавитном порядке и должен включать не менее 10 источников. Желательно, чтобы в нём были представлены зарубежные источники. Литература на иностранных языках должна следовать за литературой на русском языке.

Учебные пособия, публицистика, архивы, справочные, словарные и законодательные материалы являются источниками, не входят в список литературы и выносятся в текст статьи в виде подстрочных ссылок (сноски внизу страницы). Маркер сноски – арабская цифра, нумерация – постраничная.

Список литературы оформляется согласно ГОСТу Р 7.0.5-2008. Для каждого источника обязательно указываются издательство, общее количество страниц.

**Самоцитирование** допускается в объёме не более 20 % от общего количества источников в списке литературы.

**Объём** цитирования в статье должен составлять не более 40 % от общего объёма статьи.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТАТЬИ

**Рабочие языки:** русский и английский.

**Общие требования:** формат – А4, ориентация – книжная.

**Параметры страницы:** верхнее и нижнее – 2; левое и правое – 2,5. Шрифт Arial, кегль 14, интервал полуторный. Отступ первой строки – 1,25. Текст без переносов, выравнивание по ширине.

При использовании дополнительных шрифтов при наборе статьи следует представить их в редакцию.

При наличии в статье других языков необходимо дублировать статью в формате PDF.

На последней странице статьи указывается, что «статья публикуется впервые», ставятся дата и ФИО автора(-ов). Статья должна быть со сквозной нумерацией. На последней странице указывается, что «статья публикуется впервые», ставятся дата и подпись.

**Особенности набора слов, цифр, формул, единиц измерения:**

Единицы измерения отделяются от символов и цифр, к которым они относятся. Следует различать: О (буква) и 0 (ноль), 1 (единица) и I (римская единица или буква «и») и т. д. Необходимо отличать дефис (-) и тире (–). Не следует заменять букву «ё» на «е».

**Таблицы** оформляются в формате Word, должны быть озаглавлены и иметь сквозную нумерацию в пределах статьи, обозначаемую арабскими цифрами, например, *таблица 1*, в тексте ссылки нужно писать сокращённо *табл. 1*. Содержание таблиц не должно дублировать текст. Слова в таблицах должны быть написаны полностью, верно должны быть расставлены переносы. В ячейке таблицы в конце предложения точка не ставится.

**Рисунки** оформляются только в чёрно-белом варианте (графики, диаграммы – формат Excel, схемы, карты, фотографии), приводятся со сквозной нумерацией (арабскими цифрами) и везде обозначаются сокращённо, например *рис. 1*. Предоставляются в формате jpg (разрешение не менее 300 т/д) отдельными файлами с указанием его порядкового номера, фамилии автора(-ов) и названия статьи. Размер рисунка 170 × 240 мм. Все детали рисунка при его уменьшении должны хорошо различаться. Все **подрисуночные подписи** **подрисуночные подписи на русском и английском языках** прилагаются отдельным списком в конце статьи. Объём рисунков не должен превышать  $\frac{1}{4}$  объёма статьи.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ФИЗИКА, МАТЕМАТИКА, ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИЯ»

Электронный вариант статьи предоставляется на CD и других носителях или по электронной почте. Предоставляемые файлы должны обладать расширением **.tex** и **.pdf**. Издательство использует систему вёрстки **miktex** для Windows версии не ниже 2.7. Перечень используемых подпакетов в файле-образце.

С сайта необходимо скачать образец оформления статьи (с готовыми настройками).

**Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.**

Авторы несут полную ответственность за ссылочный аппарат, подбор и изложение фактов, представленных в статье.

Почтовые расходы по пересылке авторского экземпляра журнала составляют 200 р.



Пакет документов, необходимый для опубликования материалов, отсылается по электронной почте: [zab-nauka@mail.ru](mailto:zab-nauka@mail.ru).

Адрес редакции:

672007, г. Чита, ул. Бабушкина, 129. Забайкальский государственный университет. Редакция научных журналов (каб. 126).

**Ответственный секретарь:**

Седина Елена Витальевна,

Блажевская Ирина Николаевна.

Тел. +7(3022) 35-24-79, e-mail: [zab-nauka@mail.ru](mailto:zab-nauka@mail.ru)