

Научный журнал

Основан в 2010 г.
Выходит 4 раза в год

Учредитель
Коми научный центр
УрО РАН

ИЗВЕСТИЯ

КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

№3(15)

2013

Главный редактор:

академик *А.М. Асхабов*

Редакционная коллегия:

*д.т.н. И.Н. Андронов, д.м.н. Е.Р. Бойко, д.э.н. Н.М. Большаков,
к.г.-м.н. И.Н. Бурцев, к.и.н. И.О. Васкул, к.т.н. И.И. Волкова,
д.б.н. В.В. Володин, д.б.н. М.В. Гецен (зам. главного редактора),
д.ф.-м.н. Н.А. Громов, д.б.н. С.В. Дёгтева, к.геогр.н. Т.Е. Дмитриева,
д.и.н. И.Л. Жеребцов, чл.-корр. РАН А.В. Кучин,
д.г.-м.н. О.Б. Котова, д.б.н. Н.В. Ладанова (отв. секретарь),
чл.-корр. РАН В.Н. Лаженцев (зам. главного редактора),
д.и.н. П.Ю. Павлов, чл.-корр. РАН И.М. Роцевская, к.х.н. С.А. Рубцова,
к.и.н. А.В. Самарин (помощник главного редактора),
д.филол.н. Г.В. Федюнева, д.т.н. Ю.Я. Чукреев, д.б.н. Д.Н. Шмаков*

Редакционный совет:

*акад. В.В. Алексеев, чл.-корр. РАН В.Н. Анфилогов,
акад. В.И. Бердышев, акад. В.Н. Большаков,
д.э.н. В.Н. Задорожный, д.э.н. В.А. Ильин,
акад. В.Т. Калинин, акад. В.А. Коротеев, к.т.н. Н.А. Манов,
акад. В.П. Матвеев, акад. Г.А. Месяц, акад. Ю.С. Оводов,
чл.-корр. РАН Е.В. Пименов, акад. М.П. Роцевский,
чл.-корр. РАН А.Ф. Титов, акад. В.Н. Чарушин, д.т.н. Н.Д. Цхадая*

Адрес редакции:

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

ISSN 1994-5655

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

© Коми научный центр УрО РАН, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- В.Ф. Соколов.** Моделирование системы робастного слежения при неизвестных верхних границах возмущений и помехи измерений. Ч.II. Синтез управления и численное моделирование..... 4
- В.Ю. Андрюкова, В.Н. Тарасов.** Об устойчивости упругих систем с неустойчивыми связями12

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

- П.А. Ситников, Ю.И. Рябов, М.А.Рязанов, А.Г. Белых, И.Н. Васенева, М.С. Федосеев, В.В. Терешатов.** Влияние кислотно-основных свойств поверхности оксида алюминия на реакционную способность с эпоксидными соединениями19

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Г.В. Русанова, О.В. Шахтарова.** Особенности автоморфного почвообразования в ландшафтах Большеземельской тундры27
- О.А. Михайлов, С.В. Загирова, Н.Н. Гончарова, М.Н. Мигловец.** Суточная динамика CO₂-газообмена в системе «болото–атмосфера» в период отсутствия активной вегетации растений35
- Т.А. Майстренко, Е.С. Белых, А.В. Трапезников, В.Г. Зайнуллин, О.М. Вахрушева.** Оценка экологического риска радиационного воздействия для природных экосистем, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС.....41
- В.А. Ковалева, И.А. Лиханова, И.Б. Арчегова.** Микробиота ризосферы растений и ее роль в изменении субстрата на посттехногенных территориях крайнесеверной подзоны тайги (Республика Коми)48
- Т.В. Черняк, В.В. Головченко.** Выделение и химическая характеристика пектиновых полисахаридов из плодов калины Саржента *Viburnum sargentii* КОЕННЕ.....53
- Е.А. Лебедева.** Электрофизиологические параметры потенциалов действия клеток типа скрытого водителя ритма сердца кролика и мыши при действии лидокаина58

ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Л.Н. Андреичева.** Геологическое строение и условия формирования отложений квартера на северо-западе России62
- О.М. Вельтистова, Е.Н. Мотрюк.** Современные отечественные программные комплексы интерпретации гравимагнитных данных.....70
- Ю.Г. Шварцман, С.А. Игловский, Д.П. Горшков.** Выявление гидрогеологических особенностей гидротермального урочища Пымвашор (гряда Чернышева) методом георадиолокации81

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- И.Н. Андронов, Н.П. Богданов, Н.А. Северова, А.В. Тарсин.** Метод количественного описания зависимости модуля Юнга никелида титана от температуры87
- Ю.М. Гержберг, В.И. Киршин, А.В. Кулигин, Н.И. Кузнецов, А.Н. Горбиков.** Пути предупреждения прилипания компоновки низа буровой колонны к стенке скважины91

ИСТОРИКО-ФИЛОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Т.В. Павлина.** Функции внутренних таможенных учреждений в России в первой половине XVIII века (по материалам Коми края)96
- В.В. Понарядов.** К совершенствованию пермской этимологии 100
- А.В. Панюков.** Историзм фольклора VS фольклоризм истории: сюжет об убийстве князя Василия Вымского 103

ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

- А.А. Калинина, Е.П. Калинин.** Геолого-экономическая оценка комплексного использования ярегской тяжелой нефти 110
- И.Д. Котляров.** Интеграция в рыбной отрасли как инструмент обеспечения ее развития..... 118

ХРОНИКА 123

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОТДЕЛ (ЮБИЛЕИ) 126

CONTENTS

PHYSICAL And MATHEMATICAL SCIENCES

- V.F. Sokolov. Modelling of robust tracking system under unknown upper bounds of perturbations and measurement noise. Part II: control synthesis and simulations 4
V.Yu. Andryukova, V.N. Tarasov. Stability of elastic systems with unilateral constraints.....12

CHEMICAL SCIENCES

- P.A. Sitnikov, Yu.I. Ryabkov, M.A. Ryazanov, A.G. Belykh, I.N. Vaseneva, M.S. Fedoseev, V.V. Tereshatov. Effect of acid-base properties of the surface of alumina on reactivity with epoxy compounds19

BIOLOGICAL SCIENCES

- G.V. Rusanova, O.V. Shakhtarova. Pedogenesis in automorphic landscapes of Bolshezemelskaya tundra.....27
O.A. Mikhailov, S.V. Zagirova, N.N. Goncharova, M.N. Miglovets. The diurnal dynamics of CO₂ gas exchange in the “peatland-atmosphere” system during the period of active plant vegetation absence35
T.A. Maistrenko, E.S. Belykh, A.V. Trapeznikov, V.G. Zainullin, O.M. Vakhrusheva. Assessment of ecological risk from radiation exposure for natural ecosystems contaminated due to Chernobyl accident41
V.A. Kovaleva, I.A. Likhanova, I.B. Archegova. Microbiota of rhizosphere and its role in the change of substrate on post-technogenic territories in extreme-north subzone of taiga (the Komi Republic)48
T.V. Chernyak, V.V. Golovchenko. Isolation and chemical characterization of pectic polysaccharides from the fruits of *Viburnum sargentii* koehne.....53
E.A. Lebedeva. Electrophysiological parameters of action potentials of latent pacemaker cells of rabbit and mouse heart under the influence of lidocaine58

GEOLOGICAL And MINERALOGICAL SCIENCES

- L.N. Andreicheva. Geological structure and conditions of quaternary deposits in northwest Russia62
O.M. Veltistova, E.N. Motryuk. Modern domestic software for gravimagnetic data interpretation70
Yu.G. Shvartsman, S.A. Iglovsky, D.P. Gorshkov. Revealing of hydrogeological particularities of Pymvashor hydrothermal spring (Chernyshev ridge) by GPR81

TECHNICAL SCIENCES

- I.N. Andronov, N.P. Bogdanov, N.A. Severova, A.V. Tarsin. Method of quantitative description of temperature dependence of NiTi Young’s modulus.....87
Yu.M. Gerzhberg, V.I. Kirshin, A.V. Kuligin, N.I. Kuznetsov, A.N. Gorbikov. Prevention ways of BHA sticking to the wall of well91

HISTORICAL And PHILOLOGICAL SCIENCES

- T.V. Pavlina. Functions of internal customs offices in Russia in the first half of XIII century (on materials of the Komi territory)96
V.V. Ponaryadov. Towards improving Permian etymology 100
A.V. Panyukov. Historism of folklore vs folklorism of history: the plot about murder of prince Vasily Vymisky 103

SOCIAL SCIENCES

- A.A. Kalinina, E.P. Kalinin. Geoeconomic estimation of multipurpose utilization of the Yarega heavy oil..... 110
I.D. Kotlyarov. Integration in fish sector as an instrument of ensuring of its development..... 118

CHRONICLE123

OFFICIAL (ANNIVERSARIES)126

УДК 517.977 + 62-50

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РОБАСТНОГО СЛЕЖЕНИЯ ПРИ НЕИЗВЕСТНЫХ ВЕРХНИХ ГРАНИЦАХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ПОМЕХИ ИЗМЕРЕНИЙ. Ч. II. СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В.Ф. СОКОЛОВ

*Отдел математики Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
sokolov@dm.komisc.ru*

В статье приводится описание и результаты численного моделирования задачи робастного слежения для объекта управления с дискретным временем при неизвестных верхних границах возмущений. Передаточная функция номинальной модели управляемого объекта предполагается известной, а верхние границы внешнего возмущения, помехи измерений и операторных возмущений по выходу и управлению считаются неизвестными. Алгоритм робастного слежения базируется на ослабленной верификации оценок верхних границ в замкнутом контуре и использовании соответствующего такой верификации показателя качества задачи слежения в качестве идентификационного критерия. Во второй части статьи дается описание рекуррентного алгоритма оценивания верхних границ и построения управления. Приведенные результаты численного моделирования иллюстрируют эффективность предлагаемого метода синтеза управления.

Ключевые слова: робастное управление, задача слежения, ограниченное возмущение, неопределенность, помеха измерений

V.F. SOKOLOV. MODELLING OF ROBUST TRACKING SYSTEM UNDER UNKNOWN UPPER BOUNDS ON PERTURBATIONS AND MEASUREMENT NOISE. PART II: CONTROL SYNTHESIS AND SIMULATIONS.

This paper presents an algorithm for robust synthesis in the ℓ_1 setup in tracking problem under incomplete prior information. Nominal model in the form of linear discrete-time single-input single-output system is assumed to be known and the upper bounds on exogenous disturbance, measurement noise and coprime factor perturbations to be unknown to controller designer. Robust synthesis is based on relaxed model validation and treating the associated control criterion as the identification criterion. The second part of the paper presents a recurrent algorithm for estimation of the upper bounds and control synthesis. The efficiency of the proposed robust synthesis is illustrated by simulations.

Key words: robust control, tracking problem, bounded disturbance, uncertainty, measurement noise

Во второй части данной статьи используются многочисленные обозначения, определения, понятия и формулы из ее первой части [1]. Поэтому для понимания второй части статьи читателю необходимо иметь перед глазами и ее первую часть. Ссылки на формулы из первой части имеют вид (n-1), где n – номер формулы.

1. Синтез регулятора при неизвестных верхних границах возмущений

При непосредственном использовании наилучшей согласованной с измерениями оценки $\hat{\delta}(t) = (\delta_e(t), \delta_y(t), \delta_u(t))$ неизвестного набора $\hat{\delta}$ управление $u(t)$ в момент времени t следует вычислять исходя

из оценки $\delta_u(t)$. Для сокращения объема вычислений в задачах (30-1) можно учесть, что к списку неравенств, задающих множество $D(t-1)$, добавляется новое неравенство (19-1), соответствующее моменту времени t . При этом некоторые неравенства, задающие множество $D(t-1)$, могут оказаться лишними.

Эффективный алгоритм добавления нового линейного неравенства с отбрасыванием лишних был предложен в работе [2]. Благодаря применению этого алгоритма число линейных ограничений, задающих множество $D(t)$, может оказаться существенно меньшим теоретически возможного максимального значения $t+4$. Однако гарантировать ограниченность этого числа с ростом времени представляется

невозможным, поэтому использовать множества $D(t)$ для синтеза управления в замкнутом контуре тоже невозможно.

В этом разделе множества $D(t)$ будут заменены множественными оценками $S(t)$, задающимися только частью неравенств (19-1) благодаря введению "мертвой зоны" при обновлении оценок. Этот метод использовался в [3] в контексте задачи регулирования и может без существенных изменений применяться к рассматриваемой задаче слежения. Это позволит гарантировать ограниченность числа ограничений при оценивании верхних границ в замкнутом контуре, сходимость оценок за конечное время и субоптимальность синтезированного управления.

Перейдем к описанию алгоритма построения управления и основного результата. Выберем положительное число $\varepsilon_3 > 0$ (этот достаточно малый параметр алгоритма оценивания будет характеризовать размер мертвой зоны при обновлении множественных оценок $S(t)$) и в качестве начальной множественной оценки неизвестного набора $\hat{\delta}$ выберем множество

$$S(-1) := \{ \hat{\delta} \mid \hat{\delta} = (\delta_e, \delta_y, \delta_u) \geq 0 \}. \quad (1)$$

Новая информация о неизвестном наборе $\hat{\delta}$, получаемая в момент времени t , имеет вид линейного неравенства

$$|a(q^{-1})z(t) - q^{-d}b(q^{-1})u(t)| \leq \delta_e + \delta_y p_z(t) + \delta_u p_u(t) \quad (2)$$

(неравенства (19-1), соответствующего моменту времени t). Введя обозначения

$$e(t) := |a(q^{-1})z(t) - q^{-d}b(q^{-1})u(t)|, \\ \phi(t-1) := (1, p_z(t), p_u(t))^T,$$

перепишем неравенство (2) в виде

$$\hat{\delta} \in \Omega(t) = \{ \hat{\delta} \mid e(t) \leq \hat{\delta} \phi(t-1) \},$$

где набор $\hat{\delta}$ понимается как вектор-строка из трех чисел. Пусть $S(t-1)$ и $\hat{\delta}(t-1)$ обозначают соответственно множественную и векторную оценки набора $\hat{\delta}$ в момент времени $t-1$. Положим

$$S(t) := \begin{cases} S(t-1), & \text{если } e(t) \leq \hat{\delta}(t-1)\phi(t-1) + \\ & + \varepsilon_3 |\phi(t-1)|_2, \\ S(t-1) \cap \Omega(t), & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где $|\cdot|_2$ – евклидова норма вектора. Алгоритм обновления множественных оценок $S(t-1)$ имеет простую геометрическую интерпретацию: изменение множественной оценки $S(t-1)$ заключается в добавлении неравенства (2) и происходит в том и только в том случае, когда расстояние от оценки $\hat{\delta}(t-1)$ до подпространства $\Omega(t)$ больше ε_3 .

Далее векторная оценка $\hat{\delta}(t-1)$ и текущее значение Q^{t-1} параметра Q изменяются только в случае изменения множественной оценки $S(t-1)$ и вычисляются по формулам:

$$\hat{\delta}^k(t) := \operatorname{argmin}_{\hat{\delta} \in S(t)} \hat{J}(Q_k, \hat{\delta}), \quad k = 0, \dots, N, \quad (4)$$

$$k(t) := \operatorname{argmin}_{k \in \{0, \dots, N\}} \hat{J}(Q_k, \hat{\delta}^k(t)). \quad (5)$$

$$\hat{\delta}(t) := \hat{\delta}^{k(t)}, \quad Q^t := Q_{k(t)}. \quad (6)$$

Единственное отличие формул (4)–(6) от соответствующих формул (30-1)–(32-1) в том, что множество $D(t)$ из (30-1) заменено в (4) множественной оценкой $S(t)$.

Наконец, управление объектом (1-1) в момент времени t осуществляется регулятором

$$u(t) := (K(Q^t)z)(t), \quad (7)$$

где $K(Q^t)$ – регулятор (9-1), соответствующий вычисленному в (6) параметру Q^t .

Для формулировки утверждения о качестве построенного закона управления введем обозначение

$$\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta}) := \inf_{\|Q\| \leq C_Q} \hat{J}(Q, \hat{\delta}), \quad (8)$$

где инфимум, как и в задачах (27-1), вычисляется на множестве полиномиальных передаточных матриц $Q(\lambda)$ с нормой, ограниченной постоянной C_Q . В работе [4] показано, что значение $\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta})$ сходится к оптимальному значению $\hat{J}_{opt}(\hat{\delta})$ задачи (24-1) монотонно сверху при $C_Q \rightarrow +\infty$:

$$\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta}) \searrow \hat{J}_{opt}(\hat{\delta}) \quad \text{при } C_Q \rightarrow +\infty. \quad (9)$$

Рекомендации по выбору C_Q для получения желаемой точности приближения приведены в [4, 5].

Свойства построенного закона управления (7) сформулированы в следующей теореме.

Теорема 1. Пусть объект управления удовлетворяет уравнениям и неравенствам (1-1)–(6-1) с неизвестным набором верхних границ $\delta = (\delta_w, \delta_y, \delta_u, \delta_m)$, и управление объектом осуществляется регулятором (7). Тогда для измеряемого выхода объекта $z(t)$ при любых начальных данных в этой системе управления справедливо неравенство

$$\sup_{\Delta_1, \Delta_2} \sup_{\|w\| \leq \delta_w} \sup_{\|m\| \leq \delta_m} \|z - r\|_{ss} \leq \quad (10)$$

$$\leq \hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta}) + O(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \rightarrow 0),$$

где $\hat{\delta} = (\delta_e, \delta_y, \delta_u)$, $\delta_e = \delta_w + \delta_m \|a\| + \delta_y \delta_m$. При этом при любых реализациях возмущений число изменений множественных оценок $S(t)$, векторных оценок $\hat{\delta}(t)$ и параметров Q^t конечно.

Теорема приводится без доказательства.

2. Комментарии

В этом разделе приводится несколько поясняющих комментариев к предложенному решению задачи робастного слежения при неизвестных верхних границах возмущений.

Для объекта управления, описываемого моделью (1-1)–(6-1) с набором верхних границ возмущений $\delta = (\delta_w, \delta_y, \delta_u, \delta_m)$ и управляемого некоторым стабилизирующим регулятором $K = K(Q)$ вида (9-1), имеем цепочку неравенств для измеряемой ошибки слежения $z(t) - r(t)$:

$$\|z - r\|_{ss} \leq J_\mu(K, \delta) \leq J(K, \delta) \leq J(K, (\hat{\delta}, 0)) = \hat{J}(Q, \hat{\delta}), \quad (11)$$

где $\hat{\delta} = (\delta_e, \delta_y, \delta_u)$, $\delta_e = \delta_w + \delta_m \|a\| + \delta_y \delta_m$. Подчеркнем, что при неизвестных верхних границах δ ни одним из

неравенств цепочки (11) воспользоваться невозможно.

1. Первое неравенство не улучшаемо в силу определения (8-1) показателя качества J_μ как наилучшего асимптотического значения ошибки слежения в рассматриваемом классе операторных возмущений с ограниченной памятью μ .

2. Вычисление показателя $J_\mu(K, \delta)$ – нерешенная проблема, и второе неравенство в цепочке (11) дает его наилучшую известную в теории робастного управления верхнюю оценку $J(K, \delta)$. Эта оценка является асимптотически точной при $\mu \rightarrow +\infty$ и при достаточно естественном дополнительном предположении о поведении задающего сигнала r (см. подробности в [6, 7]).

Из сказанного следует, что конструктор системы управления может выбирать память возмущений μ в модели управляемого объекта (1-1)–(5-1) сколь угодно большой, не ухудшая при этом единственную доступную в теории оценку качества слежения в виде $J(K, \delta)$. Однако при увеличении памяти μ необходимо сохранять в памяти компьютера более длинные отрезки данных измерений для вычисления $p_z(t)$ и $p_u(t)$. Заметим, что при $\mu = +\infty$ указанные величины легко вычисляются рекуррентно без запоминания предыдущих измерений, однако в этом случае второе неравенство в цепочке (11) становится неверным при ненулевых начальных данных в замкнутой системе.

3. Показатель качества $J(K, \delta)$ является точным (т.е. наименьшей верхней границей) для операторных возмущений с конечной или затухающей памятью. Однако такие возмущения не допускают верификации модели объекта управления и непригодны в задачах управления с неполной априорной информацией и подразумевающих оценивание неизвестных параметров по данным измерений (см. подробности в [8, 9]). В то же время операторные возмущения с конечной памятью предоставляют возможность верификации модели данными измерений.

4. Последнее неравенство в цепочке (11) проистекает из метода верификации модели управляемого объекта, основанного на включении помехи измерений в состав внешнего возмущения и описанного в разделе 3 первой части статьи. Консерватизм, вносимый такой верификацией в оценку качества слежения, оценивается разностью

$$\Delta J := \hat{J}(K, \delta) - J(K, \delta) = \frac{\delta_m}{1 - \delta_y \left\| \frac{\alpha}{\chi} \right\| - \delta_u \left\| \frac{\beta}{\chi} \right\|} \times \left[2\delta_y \left\| \frac{\alpha}{\chi} \right\| + \left\| \frac{\alpha}{\chi} \right\| \left(\|a\| - \delta_u \left\| \frac{a\beta}{\chi} \right\| \right) - \left\| \frac{a\alpha}{\chi} \right\| \left(1 - \delta_u \left\| \frac{\beta}{\chi} \right\| \right) \right].$$

“Главный” вклад в оценку консерватизма вносит слабое из множителя в квадратных скобках

$$\|a\| \left\| \frac{\alpha}{\chi} \right\| - \left\| a \frac{\alpha}{\chi} \right\| \geq 0,$$

не содержащее относительно малого множителя в виде одной из верхних границ операторных возмущений (см. подробности в [7]).

5. При неизвестных верхних границах δ ни одним из неравенств (11) воспользоваться невозможно. Ослабленная верификация и теорема 1 из первой части статьи открывают возможность для оценки качества используемой модели управляемого объекта по данным измерений при неизвестных верхних границах возмущений δ . Консерватизм, вносимый ослабленной верификацией при наличии помех измерений, является платой за возможность оценки качества модели и настройки регулятора по данным измерений.

6. Главный содержательный результат настоящей работы изложен в разделах 3 и 5 первой части статьи и заключается в описании алгоритма приближенного вычисления наилучшего согласованного с измерениями на промежутке $[0, t]$ значения \hat{J}_{opt}^t показателя качества \hat{J} и регулятора, соответствующего этому значению. Важным достоинством алгоритма является то, что он применим при любом управлении объектом на промежутке $[0, t]$. Возможность эффективного приближенного решения задачи (29-1) обусловлена рядом специфических особенностей этой задачи, указанных в первой части статьи. Заметим, что менее консервативные методы верификации модели (1-1)–(6-1), основанные на использовании неизвестных значений помехи измерений в качестве вспомогательных переменных, не применимы в рассмотренной задаче синтеза управления с неполной априорной информацией в силу неприемлемой вычислительной сложности соответствующих таким методам оптимальных задач (см. подробности в [7]).

7. Рекуррентный алгоритм построения управления объектом с неизвестными верхними границами, изложенный в разделе 1, обновляет при необходимости оценки верхних границ и используемый регулятор и гарантирует при этом ограниченность чисел обновлений за счет использования мертвой зоны. Главное достоинство предложенного алгоритма управления заключено в его субоптимальности относительно показателя качества $\hat{J}(K, \delta)$. Эта субоптимальность проистекает по существу из постановки и приближенного рекуррентного решения задачи (29-1) и отражена в неравенстве (10), в котором правая часть неизвестна конструктору системы управления в силу неизвестности набора δ . Одно из достоинств алгоритма заключается в вычислении в замкнутом контуре значений $\hat{J}(Q^t, \hat{\delta}(t))$, не превосходящих правой части неравенства (10) и являющихся наилучшими согласованными с множественными оценками $S(t)$ значениями показателя качества \hat{J} . Количество обновлений всех оценок ограничено и зависит от реализаций возмущений. Алгоритм этого раздела следует общей схеме синтеза адаптивного субоптимального управления, предложенной в [10, 11].

8. При классической постановке задачи управления, т.е. при известных верхних границах возмущений, считается естественным оценивать качество замкнутой системы управления (1-1)–(6-1), (9-1) в терминах “настоящего” неизмеряемого выхода модели $y(t)$. Т.е. показателем качества замкнутой системы служит показатель (8-1), в котором измеряемый выход $z(t)$ заменен не измеряемым, но “настоящим” выходом $y(t)$. Поясним на простейшем примере, поче-

му при неизвестных верхних границах возмущений оценка качества модели в терминах “настоящего” выхода y невозможна (по существу это пояснение в равной мере относится и к классической постановке).

Рассмотрим простейшую модель управляемого объекта вида

$$y(t) = u(t-1) + w(t), \quad z(t) = y(t) + m(t), \quad r(t) = 0, \quad (12)$$

где внешнее возмущение w и помеха измерений m удовлетворяют ограничениям (3-1) и (6-1) с неизвестными δ_w и δ_m . Пусть для простоты $u(-1) = 0$ и отсутствуют операторные возмущения: $\delta_y = \delta_u = 0$. Рассмотрим ситуацию, когда нам дано единственное измерение $z(0)$. Что можно сказать о настоящем выходе $y(0)$ на основании этой информации? Очевидно, ничего более, чем $y(0) \in \mathbb{R}$. Ровно то же самое справедливо и в случае модели управляемого объекта (1-1)–(6-1). Для любого набора вещественных чисел y_0^t и любых данных измерений (z_0^t, u_0^{t-1}) существует такой набор верхних границ δ с достаточно большими компонентами, что для этого набора верхних границ и модельных помех измерений $m(s) := z(s) - y(s)$, $s = 0, \dots, t$ справедливы уравнения и неравенства (1-1)–(6-1). Другими словами, значения y_0^t могут рассматриваться как неизмеряемый выход модели (1-1)–(6-1) с указанными достаточно большими верхними границами δ .

3. Пример численного моделирования

В этом разделе приведены результаты численного моделирования, свидетельствующие об эффективности предложенного решения задачи субоптимального робастного слежения при неизвестных верхних границах возмущений, и проиллюстрированы некоторые особенности задачи, проистекающие из ее минимаксной постановки.

Пусть объект управления моделируется уравнением

$$y(t) - 2,9089y(t-1) + 3,1211y(t-2) - 1,2484y(t-3) = 2u(t-2) + 0,4u(t-1) + v(t). \quad (13)$$

Неустойчивый полином $a(\lambda)$ уравнения (13) имеет корни $0,8 \pm 0,5i$ и $0,9$, а устойчивый — $b(\lambda)$ имеет корень -5 , так что объект управления является неустойчивым и минимально фазовым с запаздыванием $d = 2$. В качестве неизвестного конструктору набора верхних границ используется набор

$$\delta = (0,1 \quad 0,03 \quad 0,1 \quad 0,05),$$

а задающий сигнал предполагается постоянным:

$$r(t) = 20 \quad \forall t.$$

Описанное в разделе 4 первой части статьи семейство субоптимальных робастных регуляторов для объекта (13) вычислялось с параметрами $N = 100$, $\varepsilon_2 = 0,0001$, $C_Q = 10 \max\{\|\alpha^0\|, \|\beta^0\|\}$, где α^0 и β^0 — полиномы из параметризации (21-1), (22-1). Соответствующая этому семейству компромиссная кривая изображена на рис. 1. Заметим, что число субоптимальных регуляторов, равное в рассматриваемом случае 16 (на рисунке две точки не отличимы от соседних ввиду их малого невидимого отличия),

как правило, оказывается существенно меньшим количества аппроксимирующих направлений $N+1$ и не возрастает при увеличении N . Заметим также, что замена коэффициента 10 на коэффициент 50 в вышеприведенной формуле для верхней границы C_Q приводит к различиям в нормах передаточных матриц порядка 10^{-7} .

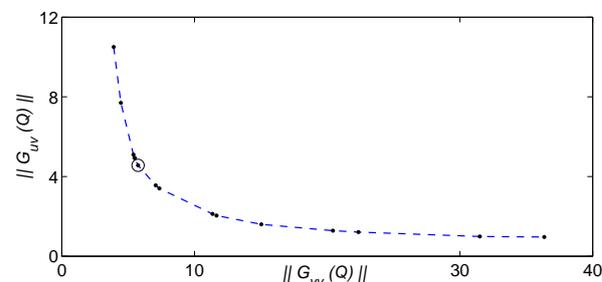


Рис. 1. Компромиссная кривая для объекта (13). Точками отмечены 16 субоптимальных пар $(\|G_{yv}(Q)\|, \|G_{uv}(Q)\|)$, кружком — оптимальная пара для показателя качества $\hat{J}(K, \delta)$ и $\delta_u = 0.1$.

Моделирование процессов управления проводилось для двух типов возмущений: случайных и с максимальной амплитудой. Случайные возмущения формировались в виде

$$v(t) = \xi_1(t)\delta_w + \xi_2(t)\delta_y p_y(t) + \xi_3(t)\delta_u p_u(t),$$

$$m(t) = \xi_4(t)\delta_m,$$

где все $\xi_i(t)$ — независимые равномерно распределенные на отрезке $[-1, 1]$ последовательности псевдослучайных величин, а $p_y(t)$ и $p_u(t)$ (см. (15-1)) вычислялись при $\mu = 10$. Начальные значения $y(0), \dots, y(d-1)$ были случайными, равномерно распределенными на отрезке $[-\delta_w, \delta_w]$.

Во всех описываемых далее численных экспериментах использовалась передаточная функция $\gamma(\lambda) = 1/b(\lambda)$, гарантирующая равенство $G_{yr} - 1 = 0$, т.е. нулевую ошибку слежения для системы без возмущений и помех.

Эксперимент 1. В первом эксперименте объект (13) на всем промежутке $[0, 1000]$ управлялся линейным стационарным регулятором $K = K(Q_0)$, которому соответствует нулевая начальная оценка неизвестной верхней границы δ_u . Регулятор $K(Q_0)$ является приближенным решением задачи

$$\inf_Q \|G_{yv}(Q)\|$$

и называется ℓ_1 -оптимальным регулятором для объекта (13) [12]. Этому регулятору соответствует пара $(\|G_{yv}(Q)\|, \|G_{uv}(Q)\|)$ на левом верхнем конце компромиссной кривой. Отметим, что для ℓ_1 -оптимального регулятора нарушено условие робастной устойчивости (12-1):

$$0,03\|G_{yv}(Q_0)\| + 0,1\|G_{uv}(Q_0)\| = 1,1774 > 1. \quad (14)$$

На рис. 2 представлен типичный график ошибки слежения $z - r$ замкнутой системы с

ℓ_1 -оптимальным регулятором. И хотя для этого регулятора не выполнено условие робастной устойчивости, поведение системы не позволяет заподозрить возможность ее дестабилизации при более неблагоприятных возмущениях.

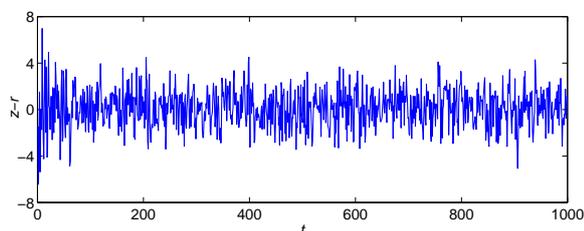


Рис. 2. График ошибки слежения $z - r$ в системе с ℓ_1 -оптимальным регулятором и случайными возмущениями.

Эксперимент 2. В этом эксперименте объект (13) на всем промежутке $[0, 1000]$ управлялся субоптимальным робастным регулятором K_{opt} , минимизирующим показатель качества $\hat{J}(K, \hat{\delta})$ при известном наборе верхних границ δ :

$$\hat{J}(K_{opt}, \hat{\delta}) = 18,226 \cong \hat{J}_{opt} := \inf_Q \hat{J}(K(Q), \hat{\delta}). \quad (15)$$

Заметим, что для этого регулятора определенное в (11-1) значение $J(K_{opt}, \delta)$ равно 15,0486, и относительные потери в качестве слежения, связанные с методом ослабленной верификации, равны

$$\frac{\hat{J}(K_{opt}, \hat{\delta}) - J(K_{opt}, \delta)}{J(K_{opt}, \delta)} = \frac{18,226 - 15,0486}{15,0486} \cong 0,211.$$

На рис. 3 представлен типичный график ошибки слежения $z - r$ для объекта (13), замкнутого субоптимальным робастным регулятором K_{opt} .

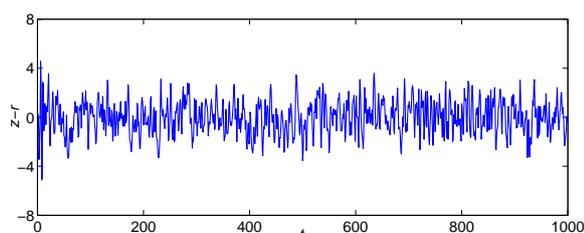


Рис. 3. График ошибки слежения $z - r$ в системе с субоптимальным относительно \hat{J} робастным регулятором и случайными возмущениями.

Приведем несколько типичных цифр, относящихся к алгоритму оценивания верхних границ (1)–(6). Параметр алгоритма ε_3 , характеризующий размер мертвой зоны при обновлении множественных оценок и гарантирующий сходимость оценок за конечное время, был выбран равным 0,0001. Обновление множественных оценок $S(t)$ и векторных оценок $\hat{\delta}(t)$ общим числом 14 происходило для данной реализации возмущений в моменты времени 3, 4, 5, 8, 9, 14, 16, 17, 22, 30, 31, 33, 201, 668. Установившемуся для $t \geq 668$ значению $\hat{\delta}(t) = (0,9031, 0, 0,0823)$ соответствовал регулятор из семейства вычисленных субоптимальных регуляторов, совпадающий с

субоптимальным регулятором задачи (15). Это означает, что с момента времени $t = 668$ объект (13) управлялся субоптимальным относительно показателя \hat{J} регулятором (что, напомним, всегда остается неизвестным конструктору). Число неравенств, задающих множественную оценку $S(t)$ при $t \geq 668$, равнялось 7, включая 3 неравенства неотрицательности верхних границ. Другими словами, всего 4 неравенства из 1000 неравенств вида (19-1) дали достаточную для выбора наилучшего регулятора информацию о множестве согласованных с измерениями оценок верхних границ. Заметим, что в многочисленных экспериментах со случайными возмущениями указанного вида число входящих в описание $S(t)$ неравенств оказывалось всегда равным 3 или 4. Столь малое число полезных информационных неравенств существенно упрощает вычисления. Отметим также, что хотя при значении параметра $\varepsilon_3 = 0$ теоретически нельзя гарантировать ограниченности (при $t \rightarrow +\infty$) числа информационных неравенств вида (2), входящих в описание множественных оценок $S(t)$, в десятках численных экспериментов это число не превосходило 5, очень редко оказываясь равным 6 на промежутках времени до 5 тыс. тактов. Общее время на моделирование процесса управления на промежутке времени $[0, 1000]$ составляло около 5 сек. на ноутбуке с процессором Intel Core Duo CPU T7300 2.00 GHz.

Эксперимент 3. В данном эксперименте объект (13) управлялся регулятором (7), использующим алгоритм оценивания неизвестных верхних границ (1)–(6). На рис. 4 представлен график ошибки слежения $z - r$ для этой замкнутой системы.

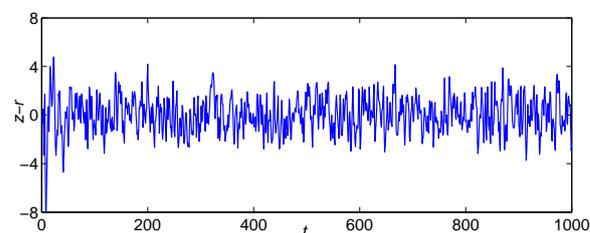


Рис. 4. График ошибки слежения $z - r$ в системе с регулятором (7) и случайными возмущениями.

Напомним, что для объекта (13) и выбранного для экспериментов набора δ неизвестные конструктору оптимальные значения показателей качества, входящие в цепочку неравенств (11), равны:

$$\inf_K J(K, \delta) \cong 15,0486,$$

$$\inf_Q \hat{J}(K(Q), \delta) \cong \inf_{\|Q\| \leq C_Q} \hat{J}(K(Q), \delta) \cong 18,2260.$$

Алгоритм оценивания (1)–(6) в момент обновления оценок вычисляет с точностью порядка $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ значение показателя качества $\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta}(t))$, являющееся наилучшим среди согласованных с неравенствами вида (2), задающими множественную оценку $S(t)$. Это значение показателя качества заведомо не превосходит значения \hat{J}_{opt}^t , определенного в (29-1), и остается согласованным с измерениями до следующего обновления оценки $\hat{\delta}(t)$, если таковая произойдет. Например, оценка $\hat{\delta}(1000)$ и соответствующее ей

значение

$$\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta}(1000)) \cong 8,7748$$

согласованы с измерениями на промежутке времени [668, 1000] и с некоторыми измерениями до момента времени 668. Если в дальнейшем произойдет обновление оценки $\hat{\delta}(1000)$, то с момента обновления начнется новый тестовый интервал, на котором новая оценка верхних границ и соответствующая ей оценка ошибки слежения будут согласованы с текущими измерениями. Значительная разница в показателях качества

$$\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta}(1000)) \cong 8,7748 < \inf_Q \hat{J}_{C_Q}(K(Q), \delta) \cong 18,2260$$

отражает то обстоятельство, что случайные возмущения являются далеко не наихудшими возмущениями, на которых и реализуется верхняя оценка $\inf_Q \hat{J}_{C_Q}(K(Q), \delta) \cong 18,2260$. Теорема 1 гарантирует, что установившаяся за конечное (но неизвестное) время оценка показателя качества $\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta}(t))$ будет согласована со всеми будущими измерениями, т.е. будет истинной. При этом она заведомо не будет превосходить оценки $\hat{J}_{C_Q}(\hat{\delta})$ с точностью порядка $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$.

Заметим, что несмотря на то, что оценке $\hat{\delta}(1000)$ соответствовал субоптимальный регулятор относительно показателя качества $\hat{J}(K, \hat{\delta})$, нельзя гарантировать, что эта оценка не изменится и не повлечет изменение регулятора. Например, во втором эксперименте с использованием этого субоптимального регулятора на всем интервале времени [0, 1000] параллельно был запущен алгоритм оценивания (1)–(6) с начальной оценкой $\hat{\delta}(-1) = (0,1, 0, 0,1)$. Векторная оценка обновилась трижды, в моменты времени 22, 25 и 92, и последний рекомендуемый алгоритмом оценивания регулятор имел номер 2 и был очень близок к ℓ_1 -оптимальному регулятору первого эксперимента.

Результаты экспериментов 1–3 свидетельствуют о том, что ошибка слежения при случайных возмущениях далека от своей верхней оценки $\hat{J}(K, \hat{\delta})$, мало чувствительна к выбору субоптимального регулятора, и алгоритм оценивания, как правило, рекомендует для управления субоптимальный регулятор из семейства, соответствующий значению верхней границы возмущений по управлению из промежутка $[0, \delta_u]$.

В следующих трех численных экспериментах для таких же замкнутых систем помеха измерений оставалась случайной, а внешние и операторные возмущения имели максимальную амплитуду:

$$v(t) = \pm(\delta_w + \delta_y p_y(t) + \delta_u p_u(t)) \text{ при } t > \mu, \quad (16)$$

где знаки + и – выбирались случайным образом с вероятностью 1/2 каждый. Хотя такое суммарное возмущение $v(t)$ не является наихудшим (на котором реализуется максимум модуля ошибки слежения), оно на определенных промежутках времени оказывается близким к наихудшему при соответствующей случайной реализации знаков.

Эксперимент 4. На рис. 5 представлен типичный график ошибки слежения $z - r$ замкнутой системы из эксперимента 1 с ℓ_1 -оптимальным регулятором, не гарантирующим робастной устойчивости.

Во всех экспериментах с возмущениями вида (16) проявлялась неустойчивость замкнутой системы, иллюстрирующая последствия нарушения условия робастной устойчивости (см. неравенство (14)). Немонотонное возрастание модуля ошибки слежения связано именно с тем, что возмущение $v(t)$ только временами аппроксимирует наихудшее возмущение.

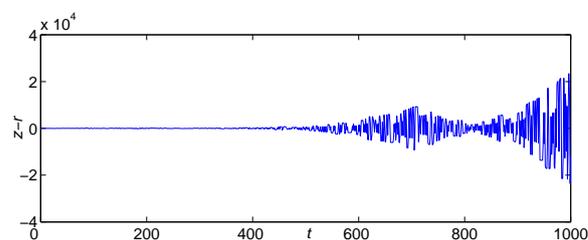


Рис. 5. График ошибки слежения $z - r$ в системе с ℓ_1 -оптимальным регулятором и возмущениями максимальной амплитуды.

Эксперимент 5. На рис. 6 представлен типичный график ошибки слежения $z - r$ замкнутой системы из эксперимента 2 с субоптимальным относительно показателя качества $\hat{J}(K, \hat{\delta})$ регулятором K_{opt} . График отражает, во-первых, существенное отличие субоптимальной замкнутой системы от системы с ℓ_1 -оптимальным регулятором и, во-вторых, то обстоятельство, что реализация возмущения (16) в типичных случаях далека от наихудшей для показателя качества $\hat{J}(K, \hat{\delta})$. Напомним, что при неизвестных верхних границах δ конструктору неизвестно, управляется ли объект субоптимальным регулятором.

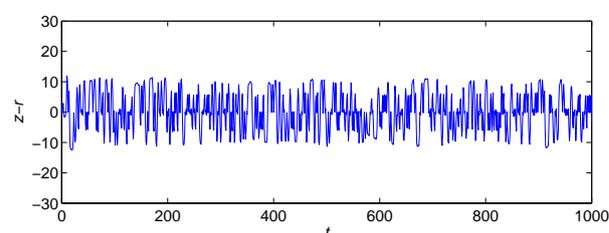


Рис. 6. График ошибки слежения $z - r$ в системе с субоптимальным относительно \hat{J} робастным регулятором и возмущениями максимальной амплитуды.

Эксперимент 6. В этом эксперименте объект (13) управлялся регулятором (7), использующим алгоритм оценивания неизвестных верхних границ (1)–(6). На рис. 7 представлен типичный график ошибки слежения $z - r$ для этой замкнутой системы.

Как видно из графика, качество слежения, обеспечиваемое регулятором (7), мало отличается от качества, обеспечиваемого субоптимальным робастным регулятором из эксперимента 5. Основное отличие заключается в относительно небольшом типичном всплеске, амплитуда которого зависит от реализации случайных величин, задействованных в формировании возмущения. Приведем опять некоторые цифры, относящиеся к алгоритму оценивания (1)–(6), применявшегося с теми же параметрами, что и в эксперименте 3. Единственное отличие экспериментов 3 и 6 заключалось в виде возмущения $v(t)$ в

объекте (13).

Обновление множественных оценок $S(t)$ происходило на промежутке $[0, 1000]$ 26 раз, последнее из которых – в момент времени 501. Установившееся для $t \geq 501$ значение $\hat{\delta}(t) = (0,4844, 0,0281, 0,0967)$ достаточно близко к неизвестному конструктору значению $\delta = (0,5154, 0,03, 0,1)$, и поэтому оценке $\hat{\delta}(t)$ соответствовал регулятор из семейства вычисленных субоптимальных регуляторов, совпадающий с субоптимальным регулятором задачи (15). Таким образом, с момента времени $t = 501$ объект (13) управлялся субоптимальным относительно показателя \hat{J} регулятором (как и в эксперименте 3). Число неравенств, задающих множественную оценку $S(t)$ при $t \geq 501$, равнялось 13, включая 3 неравенства неотрицательности верхних границ.

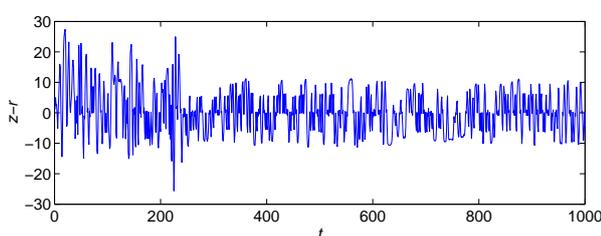


Рис. 7. График ошибки слежения $z - r$ в системе с регулятором (7) и возмущениями максимальной амплитуды.

Интересно отметить, что в этом эксперименте для установившегося с момента времени 501 наилучшего значения показателя качества $J_{CQ}(\hat{\delta}(1000))$, согласованного с неравенствами, задающими $S(1000)$ (в частности, с измерениями на промежутке $[501, 1000]$), имело место неравенство

$$\hat{J}_{CQ}(\hat{\delta}(t)) \cong 16,0083 > \inf_K J(K, \delta) \cong 15,0486,$$

несмотря на то, что

$$\max_{501 \leq t \leq 1000} |z(t) - r| = 11,3167.$$

Результаты численных экспериментов для алгоритма оценивания (1)–(6) с параметром $\varepsilon_3 = 0$ (т.е. при ликвидации мертвой зоны при обновлении оценок) не отличаются от экспериментов с параметром $\varepsilon_3 = 0,0001$. Количество неравенств, задающих множественную оценку $S(1000)$, ни разу не превысило 15, а количество обновлений оценок, как правило, не превосходило 30.

Отчетливо наблюдавшееся отличие результатов вычислений в условиях экспериментов 3 и 6, т.е. для управления объектом (13) при неизвестных верхних границах возмущений при случайных возмущениях и возмущениях максимальной амплитуды, заключается в увеличении числа неравенств, задающих множественные оценки $S(t)$, при возмущениях максимальной амплитуды. При этом оценки $\hat{\delta}(t)$ оказываются более точными, и, как следствие, в качестве используемого для управления регулятора $K(Q^t)$ чаще и быстрее устанавливается оптимальный робастный регулятор задачи (15), реже изменяющийся при обновлении оценок $\hat{\delta}(t)$.

В заключение заметим, что в рассматриваемой минимаксной детерминированной задаче управления нельзя гарантировать сходимости оценок $\hat{\delta}(t)$ к “истинному” значению δ (сходимость оценок является целью всех классических методов идентификации, базирующихся на предположениях о стохастических свойствах возмущений). В то же время близость этих оценок к “истинному” значению в эксперименте 6 можно объяснить следующими общими соображениями. При возмущениях максимальной амплитуды (включая помеху измерений) набор $\hat{\delta}$ находится на границе всех неравенств (2). Одновременно с этим возмущения максимальной амплитуды обеспечивают большую вариативность регрессионных векторов $\phi(t)$ (возможно, при этом играет роль и случайность знаков возмущений). В то же время регрессионные векторы $\phi(t)$ остаются недостаточно вариативными в установившемся режиме (все они близки к одному вектору), что является причиной малого числа неравенств, входящих в описание множественных оценок $S(t)$.

4. Заключение

Рассмотрена задача синтеза робастного регулятора слежения при неизвестных верхних границах операторных возмущений, внешнего возмущения и помехи измерений. Основные достоинства предложенного решения заключаются в следующем. Синтез робастного регулятора слежения в условиях неполной априорной информации осуществляется строго в рамках ℓ_1 -теории робастного управления без привлечения дополнительных предположений о возмущениях. Синтезированное управление является субоптимальным относительно показателя качества, порожденного методом верификации модели в замкнутом контуре и играющего роль идентификационного критерия при оценивании неизвестных верхних границ возмущений.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 12-П-1-1013.

Литература

1. Соколов В.Ф. Моделирование системы робастного слежения при неизвестных верхних границах возмущений и помехи измерений. Ч.1: Оценивание верхних границ // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2012. Выпуск 3(15). С. 4–11.
2. Walter E., Piet-Lahanier H. Exact recursive polyhedral description of the feasible parameter set for bounded error // IEEE Trans. Autom. Control. 1989. Vol. 34. P. 911–915.
3. Соколов В.Ф. Асимптотически субоптимальное робастное управление дискретным объектом при неизвестных весах возмущений // Доклады АН. 2010. Т. 431. № 1. С. 32–35.
4. Khammash M.H., A new approach to the solution of the ℓ_1 control problem: the scaled-Q method // IEEE Trans. Autom. Control. 2000. Vol. 45. P. 180–187.
5. Sokolov V.F. ℓ_1 Optimal Robust Controller for SISO Plant under Coprime Factor Perturbations

- // IEEE Trans. Autom. Control. 2000. Vol. 45. No. 12. P. 2339–2345.
6. Соколов В.Ф. Асимптотическое робастное качество дискретной системы слежения в ℓ_1 -метрике // Автомат. и телемех. 1999. № 1. С. 101–112.
 7. Соколов В.Ф. Оценка качества робастной системы управления при неизвестных верхних границах возмущений и помехи измерений // Автомат. и телемех. 2010. № 9. С. 3–18.
 8. Соколов В.Ф. Робастное управление в ℓ_1 -поставке: верификация модели и оценивание весов возмущений // Автомат. и телемех. 2003. № 11. С. 138–151.
 9. Sokolov V.F. Control-Oriented Model Validation and Errors Quantification in the ℓ_1 Setup // IEEE Trans. Autom. Control. 2005. Vol. 50. No. 10. P. 1501–1509.
 10. Соколов В.Ф. Адаптивное субоптимальное управление в случае ограниченной помехи // Автомат. и телемех. 1985. № 9. С. 78–86.
 11. Sokolov V.F. Adaptive suboptimal control of a linear system with bounded disturbances // Syst. Control Lett. 1985. Vol. 6. P. 93–98.
 12. Барабанов А.Е. Синтез минимаксных регуляторов. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1996. 222 с.

Статья поступила в редакцию 23.07.2012.

УДК 539.3

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ СИСТЕМ С НЕУДЕРЖИВАЮЩИМИ СВЯЗЯМИ

В. Ю. АНДРЮКОВА, В. Н. ТАРАСОВ

*Отдел математики, Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
veran@list.ru, vntarasov@dm.komisc.ru*

Рассматривается новый класс задач устойчивости упругих систем при односторонних ограничениях на перемещения. В отличие от классической постановки, когда решение сводится к нахождению собственных значений линейных операторов, задачи, содержащие ограничения в виде неравенств, приводят к необходимости находить "точки бифуркации" решений вариационных неравенств.

Ключевые слова: прямоугольная пластина, торообразная оболочка, кубические сплайны, односторонний контакт, метод конечных разностей, критическая сила, вариационная задача

V. YU. ANDRYUKOVA, V. N. TARASOV. STABILITY OF ELASTIC SYSTEMS WITH UNILATERAL CONSTRAINTS

New class of stability problem of elastic systems with unilateral constraints on the move is considered. In contrast to the classical case, when the solution is reduced to the eigenvalue problem of linear operators, problems containing inequality constraints, lead to the need to find "bifurcation point" solutions of variational inequalities.

Key words: rectangular plate, toroidal shell, cubic splines, unilateral contact, finite difference method, critical force, variational problem

1. Введение

Решение классических задач на устойчивость упругих систем сводится к проблеме на собственные значения линейных операторов. В данной работе исследуется влияние односторонних ограничений на перемещения. В отличие от классического случая, наличие неудерживающих связей приводит к необходимости находить "точки бифуркации" решений вариационных задач, содержащих ограничения в виде неравенств. Подробно рассматриваются задачи устойчивости прямоугольных пластин и торообразной оболочки при односторонних ограничениях на перемещения. Для конечномерной аппроксимации используются кубические сплайны. В первой части работы решается задача устойчивости прямоугольной пластины, прогиб которой ограничен двумя жесткими ребрами так, что контакт между пластиной и ребрами является односторонним, при этом на двух кромках пластины выполняются граничные условия свободного края. Во второй части рассматривается осесимметричная задача устойчивости торообразной оболочки вращения с упругим наполнителем внутри, находящейся под действием внешнего нормального давления. Для вычисления работы внешних сил используется точная термодинамическая формула. Исследуется влияние нелинейных слагаемых, обусловленных односторонним контактом с упругим наполнителем, на величину критической силы.

2. Устойчивость прямоугольных пластин при односторонних ограничениях на перемещения**2.1. Постановка задачи**

Пусть прямоугольная пластина нагружена по краям $x = 0$, $x = a$; $0 \leq y \leq b$ нормальными усилиями σ . Обозначим через $w(x, y)$, $0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$ прогиб пластины. Потенциальная энергия деформации пластины имеет вид [3]:

$$U(w) = \frac{D}{2} \int_0^a \int_0^b ((\Delta w)^2 - (1 - \nu)L(w, w)) dx dy, \quad (1)$$

где

$$\Delta w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2},$$

$$L(w, w) = 2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right).$$

Работа внешних сил может быть вычислена по формуле [3]

$$V(w) = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \sigma \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy. \quad (2)$$

Задача об устойчивости пластины сводится к отысканию сил σ таких, что вариационная проблема

$$U - V \rightarrow \min_w \quad (3)$$

имеет нетривиальное решение.

Предположим теперь, что прогиб пластины может быть ограничен жесткими препятствиями так, что

$$\begin{cases} w(x, y_1) \leq 0, & \text{при } x \in [0, a], \\ w(x, y_2) \geq 0, & \text{при } x \in [0, a], \end{cases} \quad (4)$$

где y_1, y_2 – фиксированные переменные из $(0, b)$. Функцию w будем аппроксимировать сплайнами [7]

$$w(x, y) = \sum_{i=0}^{n+2} \sum_{j=0}^{m+2} w_{ij} B_i(x) \tilde{B}_j(y), \quad (5)$$

где

$$x \in [0, l], \quad l = a, \quad h = \frac{l}{n}, \quad x_i = ih,$$

$$B_i(x) = B(x - (i - 3)h), \quad i = 3..n - 1,$$

$$B(x) = \frac{1}{4h^4} \left(\frac{1}{6}x_+^3 - \frac{2}{3}(x - h)_+^3 + (x - 2h)_+^3 - \frac{2}{3}(x - 3h)_+^3 + \frac{1}{6}(x - 4h)_+^3 \right),$$

$$B_0(x) = 1 + \frac{1}{h^3} \left(-\frac{1}{6}x_+^3 + \frac{1}{2}(x - h)_+^3 - \frac{1}{2}(x - 2h)_+^3 + \frac{1}{6}(x - 3h)_+^3 \right),$$

$$B_1(x) = x + \frac{1}{h^2} \left(-\frac{1}{3}x_+^3 + \frac{5}{6}(x - h)_+^3 - \frac{2}{3}(x - 2h)_+^3 + \frac{1}{6}(x - 3h)_+^3 \right), \quad (6)$$

$$B_2(x) = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{h} \left(-\frac{11}{36}x_+^3 + \frac{1}{2}(x - h)_+^3 - \frac{1}{4}(x - 2h)_+^3 + \frac{1}{18}(x - 3h)_+^3 \right),$$

$$B_n(x) = B_2(l - x), \quad B_{n+1}(x) = B_1(l - x),$$

$$B_{n+2}(x) = B_0(l - x), \quad x_+ = \max\{0, x\} = \frac{1}{2}(|x| + x).$$

Меняя в определении сплайнов x на y , n на m и полагая $l = b$, получим $\tilde{B}_j(y)$. Подставляя (5) в (1) и (2) получим две квадратичные формы соответственно

$$\tilde{f}(w_{ij}) = \frac{D}{2} \sum_{i,j} \sum_{ks} q_{ijks} w_{ij} w_{ks}, \quad (7)$$

$$\tilde{g}(w_{ij}) = \frac{\sigma}{2} \sum_{i,j} \sum_{ks} r_{ijks} w_{ij} w_{ks}. \quad (8)$$

Квадратичная функция $\tilde{f}(w_{ij})$ аппроксимирует упругую энергию пластины, $\tilde{g}(w_{ij})$ – работу внешних сил. Коэффициенты q_{ijks}, r_{ijks} есть интегралы по площади пластины от произведений B_i и их производных, в частности

$$r_{ijks} = \int_0^a B'_i(x) B'_k(x) dx \int_0^b \tilde{B}_j(y) \tilde{B}_s(y) dy.$$

Все эти интегралы могут быть вычислены аналитически с использованием системы MAPLE. Обозначим через $f(w_{ij}) = 1/D \tilde{f}(w_{ij})$ и $g(w_{ij}) = 1/\sigma \tilde{g}(w_{ij})$.

Если положить

$$w_{0,j} = 0, \quad w_{2,j} = 0, \quad w_{n,j} = 0, \quad w_{n+2,j} = 0,$$

$j \in [1 : m]$, то при $x = 0, x = a$ будут выполнены граничные условия шарнирного опирания:

$$\begin{cases} w(0, y) = w(a, y) = 0, \\ w_{xx}(0, y) = w_{xx}(a, y) = 0, \end{cases} \quad 0 \leq y \leq b. \quad (9)$$

Если же положить

$$w_{0,j} = 0, \quad w_{1,j} = 0, \quad w_{n+1,j} = 0, \quad w_{n+2,j} = 0,$$

$j \in [1 : m]$, то при $x = 0, x = a$ будут выполнены граничные условия жесткой заделки:

$$\begin{cases} w(0, y) = w(a, y) = 0, \\ w_x(0, y) = w_x(a, y) = 0, \end{cases} \quad 0 \leq y \leq b. \quad (10)$$

Будем предполагать, что при $y = 0, b$ выполнены граничные условия свободного края:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} = 0, \\ \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x \partial y^2} = 0, \end{cases} \quad 0 \leq x \leq a. \quad (11)$$

Специально этим условиям удовлетворять не надо, так как коэффициенты $w_{i,0}, w_{i,1}, w_{i,2}, w_{i,m+2}, w_{i,m}, w_{i,m+1}$ находятся в результате решения задачи оптимизации. Граничные условия (11) являются “неудобными” в вычислительном отношении, так как они содержат производные третьего порядка.

Потребуем выполнение неравенств (4) в конечном числе точек:

$$\begin{cases} w(x_j, y_1) \leq 0, & -w(x_j, y_2) \leq 0, \\ x_1 = \frac{1}{4}a, & x_2 = \frac{1}{2}a, & x_3 = \frac{3}{4}a, \\ y_1 = \frac{1}{3}b, & y_2 = \frac{2}{3}b. \end{cases} \quad (12)$$

Подставляя (5) в (12) получим систему линейных неравенств, которым должны удовлетворять коэффициенты w_{ij} . Запишем эти неравенства в виде

$$\sum_{k=1}^6 b_{ijk} w_{ij} \leq 0. \quad (13)$$

Обозначим через Γ конус, определяемый неравенствами (13). Таким образом, вместо (3)–(4) получаем задачу отыскания минимального числа λ^* такого, что задача нелинейного программирования

$$f(w_{ij}) - \lambda^* g(w_{ij}) \rightarrow \min_{w_{ij} \in \Gamma} \quad (14)$$

имеет нетривиальное решение. Она сводится к проблеме идентификации условной положительной определенности квадратичных форм на конусах.

2.2. Об условной положительной определенности квадратичных форм на конусах

Рассмотрим задачу нелинейного программирования

$$f(u) = \frac{1}{2}(Au, u) \rightarrow \min_{u \in R^n} \quad (15)$$

при ограничениях

$$g(u) = \frac{1}{2}(Qu, u) = 1, \quad (16)$$

$$(b_j, u) \leq 0, \quad j \in I = 1 : m. \quad (17)$$

Здесь A – положительно определенная, Q – неотрицательно определенная квадратные матрицы порядка n , $b_j \in R^n$. Пусть u^* – решение задачи (15)–(17). По теореме Куна – Таккера найдутся множители Лагранжа $\mu_j \geq 0$, $j \in 1 : m$ и λ^* такие, что

$$\begin{cases} Au^* - \lambda^* Qu^* + \sum_{j=1}^m \mu_j b_j = 0, \\ g(u^*) = 1, \\ \mu_j (b_j, u^*) = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Определение 1. Точки u^* , удовлетворяющие (18), будем называть стационарными.

Введем обозначение $B(\lambda) = A - \lambda Q$. Можно показать, что для любых $\lambda \leq \lambda^*$ ($B(\lambda)u, u \geq 0$, для всех $u \in \Gamma$, и, напротив, если $\lambda > \lambda^*$, то найдется вектор $\bar{u} \in \Gamma$ такой, что $(B(\lambda)\bar{u}, \bar{u}) < 0$. Очевидно также, что $\lambda^* = f(u^*)$. Таким образом, матрица $B(\lambda)$ при $\lambda \leq \lambda^*$ будет условно положительно определенной на конусе Γ . Вопросы идентификации условной положительной определенности квадратичных форм на конусах рассматривались в работах [8], [9]. Там получены критерии условной положительной определенности квадратичных форм в важном частном случае, когда $\Gamma = \{u \in R^n \mid u_j \geq 0, j \in 1 : n\}$. Их применение сводится к вычислению большого количества определителей (в общем случае 2^n), и в этом отношении является крайне неэкономичным.

Сформулируем метод последовательных приближений для поиска стационарных точек. Пусть решение $u_0 \in \Gamma$, $g(u_0) = 1$ некоторое начальное приближение. Пусть уже получена точка $u_k \in \Gamma$, $g(u_k) = 1$. Обозначим

$$\tilde{\Gamma}_k = \{u \in \Gamma, |(Qu_k, u - u_k) = 0\}. \quad (19)$$

Найдем точку $\tilde{u}_k \in \tilde{\Gamma}_k$ такую, что

$$\frac{1}{2}(A\tilde{u}_k, \tilde{u}_k) = \min_{u \in \tilde{\Gamma}_k} \frac{1}{2}(Au, u). \quad (20)$$

Далее полагаем

$$u_{k+1} = s_k^{-1} \tilde{u}_k, \text{ где } s_k = \sqrt{g(\tilde{u}_k)}. \quad (21)$$

Поскольку \tilde{u}_k – решение задачи минимизации (20), то найдутся множители Лагранжа $\mu_{kj} \geq 0$ и λ_k такие, что

$$\begin{cases} A\tilde{u}_k - \lambda_k Q\tilde{u}_k + \sum_{j=1}^m \mu_{kj} b_j = 0, \\ (Q\tilde{u}_k, \tilde{u}_k - u_k) = 0, \\ \mu_{kj} (b_j, \tilde{u}_k) = 0. \end{cases} \quad (22)$$

Можно показать, что последовательность $\{\lambda_k\}$ монотонно убывает, ограничена снизу, и любая предельная точка последовательности $\{\lambda_k\}$ является стационарной. Обозначим предел последовательности $\{\lambda_k\}$ через λ_* .

Замечание 1. Предлагаемый метод является локальным, и он сходится к решению задачи (15)–(17), если удачно выбрано начальное приближение. После того, как получено λ_* , можно воспользоваться методом ветвей и границ [10] для проверки условной неотрицательной определенности матрицы $A - \lambda_* Q$ на конусе Γ . Обычно в реальных задачах матрица

$A - \lambda_* Q$ имеет небольшое число отрицательных собственных чисел, а трудоемкость метода ветвей и границ в задачах невыпуклого квадратичного программирования оценивается числом отрицательных собственных чисел матрицы. Если же применять метод ветвей и границ непосредственно к задаче (15) – (17), то объем вычислительной работы будет зависеть от размерности пространства переменных.

Замечание 2. На каждом шаге предлагаемого алгоритма требуется решать задачу минимизации выпуклой квадратичной функции при линейных ограничениях (задачу выпуклого квадратичного программирования). Последняя значительно проще исходной.

Замечание 3. Если $I = \emptyset$, т.е. $\Gamma = R^n$ и Q – единичная матрица, то предлагаемый алгоритм превращается в известный метод Келлога для поиска минимального собственного числа матрицы A .

2.3. Обсуждение результатов

В табл. 1 приведены результаты вычислений значения критического параметра $\sigma^* = D^{-1}\sigma$ при $a = 1$ для различных видов граничных условий: I – граничные условия шарнирного опирания (10), II – смешанные граничные условия, когда на левом крае $x = 0$ выполнены условия (9), на правом – условия жесткой заделки (10), III – граничные условия жесткой заделки (10), IV – при $x = 0, a, 0 \leq y \leq b$ – граничные условия шарнирного опирания и при $0 \leq x \leq a, y = 0, b$ граничные условия свободного края. В двух последних строках таблицы представлены значения σ^* без ограничений на перемещения, вычисленные теоретически (предпоследняя строка) и методом, рассмотренным в п.2.2. (последняя строка).

Таблица 1

Значения критической силы σ^* при различных граничных условиях

Гран. усл.	I	II	III	IV
$b = 1$	21.95	32.21	51.49	8.98
$b = 0.5$	60.40	69.44	91.85	5.37
Теор.	$\pi^2 \approx$ ≈ 9.87	$2\pi^2 \approx$ ≈ 19.74	$4\pi^2 \approx$ ≈ 39.48	$\pi^2/4 \approx$ ≈ 2.47
Прибл.	9.98	20.24	39.98	2.44

Из сравнения результатов 4 и 5 строки таблицы можно сделать вывод, что редукция вариационной задачи к задаче квадратичного программирования при помощи сплайнов является адекватной и достаточно точной. Так как при отсутствии ограничений на перемещения при граничных условиях свободного края при $y = 0, b$ решение задачи $w(x, y)$ не зависит от y (см. рисунок справа), то точные значения критических сил совпадают с эйлеровыми силами для стержней [3], и не зависят от b . При наличии односторонних ограничений на перемещения значения критических сил зависят от b . Влияние односторонних связей на перемещения (неравенства (4)) значительно повышает критическую нагрузку и может быть использовано для повышения несущей способности сжимаемых по кромкам пластин. Численные эксперименты показали, что выполнение ограничений (12) в нашем случае гарантируют выполнение неравенств (4). Различия в формах равновесия при наличии и отсут-

ствии ограничений на перемещения проиллюстрировано на рисунке.

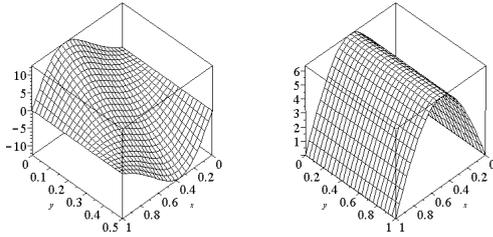


Рис. Форма равновесия пластины после потери устойчивости при наличии односторонних ограничений на перемещения (слева) и без ограничений на перемещения (справа).

3. Устойчивость торообразной оболочки при одностороннем подкреплении

3.1. Определение упругой энергии и работы внешних сил

Предположим, что оболочка, срединную поверхность которой обозначим через S , в результате деформации приобрела форму \tilde{S} . Обозначим через g_{ij} , h_{ij} , \tilde{g}_{ij} , \tilde{h}_{ij} , $i, j = 1, 2$ коэффициенты первой и второй квадратичных форм недеформированной и деформированной поверхности соответственно. Предполагается, что деформация является осесимметричной. Согласно [2] энергию деформации, связанную с переходом из состояния S в состояние \tilde{S} , можно вычислить по формуле:

$$U = \int \int \Phi_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \kappa_1, \kappa_2) ds, \quad (23)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)}(\kappa_1^2 + \kappa_2^2 + 2\nu\kappa_1\kappa_2) + \frac{Eh}{2(1-\nu^2)}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + 2\nu\varepsilon_1\varepsilon_2),$$

E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, ε_1 и ε_2 – экстремальные значения отношения

$$\frac{\sum_{i,j=1}^2 (\tilde{g}_{ij} - g_{ij}) du_i du_j}{\sum_{i,j=1}^2 g_{ij} du_i du_j}, \quad (24)$$

κ_1 и κ_2 – экстремальные значения отношения

$$\frac{\sum_{i,j=1}^2 (\tilde{h}_{ij} - h_{ij}) du_i du_j}{\sum_{i,j=1}^2 g_{ij} du_i du_j}. \quad (25)$$

В результате осесимметричной деформации поверхность \tilde{S} представляет собой поверхность вращения вокруг оси z некоторой кривой γ , расположенной в плоскости XOZ и задаваемой уравнениями $x = \varphi(\theta)$, $z = \psi(\theta)$. Точка $(\varphi(\theta), 0, \psi(\theta))$ кривой γ при повороте на угол λ переходит в точку $(\varphi(\theta) \cos \lambda, \varphi(\theta) \sin \lambda, \psi(\theta))$, тогда уравнения поверхности вращения будут иметь вид [1]

$$\begin{cases} x = \varphi(\theta) \cos \lambda, \\ y = \varphi(\theta) \sin \lambda, \\ z = \psi(\theta). \end{cases} \quad (26)$$

Рассмотрим задачу устойчивости тора, нагруженного внешним нормальным давлением. Тогда в (24) и (25) $u_1 = \theta$ – полярный угол в плоскости меридиана, $u_2 = \lambda$ – угол в плоскости параллельного круга. Обозначим через $w(\theta)$ и $u(\theta)$ нормальное и касательное перемещения точек поверхности тора. Декартовы координаты точек торообразной поверхности до деформации будут определяться уравнениями

$$\begin{cases} x = (R + a \cos \theta) \cos \lambda, \\ y = (R + a \cos \theta) \sin \lambda, \\ z = a \sin \theta, \end{cases} \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \lambda \leq 2\pi, \quad (27)$$

т.е. для недеформированного тора $\varphi = R + a \cos \theta$, $\psi = a \sin \theta$. После деформации уравнения поверхности будут иметь вид (26), где

$$\begin{cases} \varphi(\theta) = R + (a + w(\theta)) \cos \theta - u(\theta) \sin \theta, \\ \psi(\theta) = (a + w(\theta)) \sin \theta - u(\theta) \cos \theta. \end{cases} \quad (28)$$

Будем исследовать потерю устойчивости в малом по осесимметричной форме, когда образующие выпучины имеют вид кольцевых складок в направлении координаты λ (перемещения не зависят от λ). Для поверхности вращения первая и вторая квадратичная формы поверхности записываются в виде [1]

$$\begin{cases} I = (\varphi'^2 + \psi'^2) d\theta^2 + \varphi^2 d\lambda^2, \\ II = \left(\frac{\psi''\varphi' - \psi'\varphi''}{\sqrt{\varphi'^2 + \psi'^2}} \right) d\theta^2 + \frac{\psi'\varphi}{\sqrt{\varphi'^2 + \psi'^2}} d\lambda^2. \end{cases} \quad (29)$$

Для недеформированной поверхности:

$$\begin{cases} I_0 = a^2 d\theta^2 + (R + a \cos \theta)^2 d\lambda^2, \\ II_0 = ad\theta^2 + \cos \theta (R + a \cos \theta) d\lambda^2. \end{cases} \quad (30)$$

Используя формулы (24), (25), (27), (29), (30), можно получить выражения для деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и кривизн κ_1, κ_2 . Квадратичные формы I и II в случае осесимметричной деформации имеют диагональный вид. Поэтому

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{\varphi'^2 + \psi'^2 - a^2}{a^2}, \\ \varepsilon_2 = \frac{\varphi^2 - (R + a \cos \theta)^2}{(R + a \cos \theta)^2}, \\ \kappa_1 = \frac{\psi''\varphi' - \psi'\varphi''}{a^2 \sqrt{\varphi'^2 + \psi'^2}} - \frac{1}{a}, \\ \kappa_2 = \frac{\psi'\varphi - \cos \theta (R + a \cos \theta) \sqrt{\varphi'^2 + \psi'^2}}{\cos^2 \theta (R + a \cos \theta)^2 \sqrt{\varphi'^2 + \psi'^2}}. \end{cases} \quad (31)$$

Для внешнего нормального давления в соответствии с теоремой Эйлера-Бернулли работа внешних сил равна

$$A = P \Delta V,$$

где ΔV – изменение объема оболочки в результате деформации. Как известно [6], объем тела, поверхность которого задается уравнениями $x = x(\theta, \lambda)$, $y = y(\theta, \lambda)$, $z = z(\theta, \lambda)$, определяется (с точностью до знака) интегралом

$$V = \frac{1}{3} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \det \begin{bmatrix} x' & y' & z' \\ x'_\theta & y'_\theta & z'_\theta \\ x'_\lambda & y'_\lambda & z'_\lambda \end{bmatrix} d\theta d\lambda. \quad (32)$$

В случае осесимметричной деформации определитель в (32) не зависит от λ . Используя формулы (26)–(28) объем оболочки после деформации можно вычислить по формуле:

$$V = \frac{2\pi}{3} \int_0^{2\pi} \Phi_2(w, u, w', u') d\theta, \quad (33)$$

где

$$\Phi_2 = \det \|a_{ij}\|, i, j \in 1 : 3,$$

элементы матрицы $\|a_{ij}\|$ имеют вид

$$\begin{aligned} a_{11} &= R + a \cos \theta + w(\theta) \cos \theta - u(\theta) \sin \theta, \\ a_{13} &= a \sin \theta + w(\theta) \sin \theta + u(\theta) \cos \theta, \\ a_{21} &= -a \sin \theta + w'(\theta) \cos \theta - w(\theta) \sin \theta - \\ &\quad - u'(\theta) \sin \theta - u(\theta) \cos \theta, \\ a_{23} &= a \cos \theta + w'(\theta) \sin \theta + w(\theta) \cos \theta + \\ &\quad + u'(\theta) \cos \theta - u(\theta) \sin \theta, \\ a_{32} &= R + a \cos \theta + w(\theta) \cos \theta - u(\theta) \sin \theta, \\ a_{12} &= 0, \quad a_{22} = 0, \quad a_{31} = 0, \quad a_{33} = 0. \end{aligned}$$

Предположим, что внутри оболочки находится упругий наполнитель, который работает как простое винклеровское основание с жесткостью C . Тогда полная энергия деформации будет иметь вид

$$J = J_1 + J_2 - PJ_3,$$

где

$$\begin{aligned} J_1 &= 2\pi \int_0^{2\pi} \Phi_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \kappa_1, \kappa_2) a(R + a \cos \theta) d\theta, \\ J_2 &= 2\pi \int_0^{2\pi} \frac{C}{2} w^2 a(R + a \cos \theta) d\theta, \quad (34) \\ J_3 &= \Delta V. \end{aligned}$$

В устойчивом положении равновесия полная энергия принимает минимальное значение. Таким образом, приходим к вариационной задаче

$$J \rightarrow \min_{w, u}, \quad (35)$$

где функции w, u удовлетворяют условиям периодичности.

3.2. Численный метод

Как и выше, перемещения $w(\theta)$ и $u(\theta)$ будем аппроксимировать сплайнами

$$w = \sum_{j=0}^{n+2} w_j B_j(\theta), \quad u = \sum_{j=0}^{n+2} u_j B_j(\theta), \quad (36)$$

где $B_j(\theta)$ определяются формулами (6) с заменой x на θ при $a = 2\pi$. Граничные условия периодичности будут выполнены, если положить

$$w_0 = w_{n+2}, \quad w_1 = -w_{n+1}, \quad w_2 = w_n,$$

$$u_0 = u_{n+2}, \quad u_1 = -u_{n+1}, \quad u_2 = u_n.$$

Введем вектор $z \in R^{2n}$ с компонентами:

$$z_1 = w_0, \quad z_2 = w_1, \quad \dots, \quad z_n = w_{n-1},$$

$$z_{n+1} = u_0, \quad z_{n+2} = u_1, \quad \dots, \quad z_{2n} = u_{n-1}. \quad (37)$$

Подставляя (36) в функционалы J_1, J_2, J_3 , получим соответственно функции $f_1(z), f_2(z), f_3(z)$ и

$$f(z; P) = f_1(z) + f_2(z) - Pf_3(z).$$

Необходимое условие экстремума записывается в виде

$$\frac{\partial f(z, P)}{\partial z} = 0. \quad (38)$$

Для решения задачи устойчивости оболочки требуется найти минимальное значение силы P , при котором происходит бифуркация решения системы уравнений (38). Необходимое условие бифуркации заключается в том, что матрица вторых частных производных становится вырожденной, т.е.

$$\det \left[\frac{\partial^2 f(z, P)}{\partial z^2} \right] = 0. \quad (39)$$

Введем в рассмотрение матрицы

$$Q_1 = \frac{\partial^2 f_1(0)}{\partial z^2}, \quad Q_2 = \frac{\partial^2 f_2(0)}{\partial z^2}, \quad G = \frac{\partial^2 f_3(0)}{\partial z^2}.$$

Тогда уравнение (39) означает, что система уравнений

$$Q_1 z + Q_2 z = \mu G z \quad (40)$$

имеет нетривиальное решение, где $\mu = P$ – обобщенное собственное число. Отметим, что

$$f_2(z) = \frac{1}{2} (Q_2 z, z).$$

Задача поиска обобщенного собственного числа для системы (40) может быть сформулирована в виде экстремальной проблемы

$$\chi(z) = \frac{1}{2} (Q_1 z, z) + \frac{1}{2} (Q_2 z, z) \rightarrow \min \quad (41)$$

при ограничениях

$$\xi(z) = \frac{1}{2} (G z, z) = 1. \quad (42)$$

В самом деле, применяя правило множителей Лагранжа к задаче (41)–(42), получим уравнение (40).

Предположим, что оболочка может отходить от наполнителя при $w > 0$, т.е. сила реакции наполнителя имеет вид

$$Cw_- = C \min \{0, w\} = -\frac{C}{2} (|w| - w), \quad (43)$$

а энергия, связанная с упругим наполнителем, вычисляется по формуле

$$\Psi_1 = \pi \int_0^{2\pi} C(w_-)^2 a(R + a \cos \theta) d\theta. \quad (44)$$

Пусть $v(\theta)$ 2π -периодическая функция, и определим функционал

$$\Psi_2 = 2\pi \int_0^{2\pi} \frac{C}{2} v^2(\theta) a(R + a \cos \theta) d\theta.$$

Рассмотрим экстремальную задачу

$$\tilde{J} = J_1 + \Psi_2 - PJ_3 \rightarrow \min_{w,u,v} \quad (45)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} v(\theta) - w(\theta) \leq 0, \\ v(\theta) \leq 0. \end{cases} \quad (46)$$

Ясно, что задача (45)–(46) эквивалентна задаче минимизации функционала

$$\Psi = J_1 + \Psi_1 - PJ_3. \quad (47)$$

Далее для исследования задачи (45) можно применить метод, описанный в параграфе 2.2.

При конечномерной аппроксимации функционала Ψ_1 вместо функции $f_2(z)$ получаем функцию $\tilde{f}_2(z)$. Поэтому уравнение (40) не имеет места, ибо матрица Q_2 не существует. Заметим, что $\tilde{f}_2(z)$ является положительно однородной функцией, т.е. для любого $\alpha > 0$ следует $\tilde{f}_2(\alpha z) = \alpha^2 \tilde{f}_2(z)$, поэтому в данном случае вместо задачи (41)–(42) получаем задачу минимизации функции

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} (Q_1 z, z) + \tilde{f}_2(z) \rightarrow \min \quad (48)$$

при ограничениях (42). Функция $\Phi(z)$ является непрерывно дифференцируемой, но не имеет непрерывных вторых частных производных.

Для решения задач (41)–(42) применялся метод последовательных приближений [5]: пусть z_0 – начальное приближение, причем $\xi(z_0) = 1$. Пусть получена точка z_k . Тогда \tilde{z}_{k+1} есть решение задачи выпуклого программирования

$$\Phi(z) \rightarrow \min$$

при ограничениях

$$(Gz_k, z) = (Gz_k, z_k) = 2.$$

Пусть $\alpha_k = \xi(\tilde{z}_{k+1})$. Тогда

$$z_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_k}} \tilde{z}_{k+1}.$$

Можно показать, что любая предельная точка последовательности z_k является стационарной, т.е. удовлетворяет правилу множителей Лагранжа

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \mu Gz_*, \quad (49)$$

где μ – обобщенное собственное число и z_* – собственный вектор.

3.3. Результаты численных экспериментов

В работе [3] на основании линейной теории тонких оболочек приведена формула критического нормального давления для торообразной оболочки:

$$q = \frac{\psi Eh}{a(1 - \nu^2)}, \quad (50)$$

где

$$\begin{aligned} \psi = & \frac{4k^2 \left(n^2 + \frac{1-\nu^2}{2} n^2 k^2 + (1+\nu)^2 k^2 + (1+\nu) \right)}{(4+k^2)(n^4(2+k^2) + (1+\nu)k^2 n^2)} + \\ & + \frac{2h^2 \left(n^2 - 1 + \frac{n^2 k^2}{2} \right) \left(n^2 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + k^2 \right)}{3a^2(4+k^2) \left(n^2(2+k^2) + (1+\nu)k^2 \right)} + \\ & + \frac{h^2 k^2}{6a^2(4+k^2)}, \end{aligned}$$

$k = \frac{a}{R}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ и n выбирается из условия минимума q в (50).

В табл.2 приведены значения критического параметра

$$\tilde{q} = \frac{h^3}{12(1 - \nu^2)} P$$

и значения параметра q , вычисленные по формуле (49). Из табл.2 видно, что при используемой в работе аппроксимации наблюдается удовлетворительное совпадение с теоретическими результатами.

Таблица 2
Сравнение результатов с известными значениями критического давления

h	0.346	0.346	0.346	0.489	0.489	0.489
R	20	15	15	10	15	20
a	5	5	4	2.5	5	5
\tilde{q}	0.012	0.017	0.021	0.036	0.014	0.022
q	0.012	0.012	0.019	0.037	0.017	0.017

В табл.3 введены следующие обозначения: C – жесткость наполнителя, q^* – значение критического параметра в случае жесткой связи с оболочкой упругого наполнителя (см. (34)), q_* – значение критического параметра в случае, когда оболочка может отходить от наполнителя (см. (44)), q – значение критического параметра для оболочки без наполнителя ($C = 0$).

Таблица 3
Значения критического давления для торообразной оболочки с упругим наполнителем внутри

h	0.346	0.346	0.346	0.346	0.489	0.489
R	20	20	15	15	20	20
a	5	5	5	5	5	5
C	1	3	1	3	1	3
q^*	0.017	0.026	0.022	0.030	0.034	0.058
q_*	0.015	0.021	0.021	0.026	0.029	0.041
q	0.013	0.013	0.017	0.017	0.017	0.017

Таким образом, учет условия “односторонности” контакта оболочки и наполнителя является

необходимым при решении задачи на устойчивость. Отметим, что в работе использовалась точная нелинейная теория оболочек. На необходимость применения нелинейной теории оболочек при решении задач на устойчивость указывается в работе [4].

Литература

1. *Погорелов А.В.* Дифференциальная геометрия. М.: Наука, 1974. 176 с.
2. *Погорелов А.В.* Геометрическая теория устойчивости оболочек. М.: Наука, 1966. 296 с.
3. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
4. *Паймушин В.Н.* Проблемы геометрической нелинейности и устойчивости в механике тонких оболочек и прямолинейных стержней // ПММ Т71. 2007. Вып.5. С.880 – 893.
5. *Тарасов В.Н.* Об устойчивости упругих систем при односторонних ограничениях на перемещения // Труды Института математики и механики. Российская академия наук. Уральское отделение. 2005. Т. 11. № 1. С. 177–188.
6. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Физматгиз, 1963. Т. 3. 656 с.
7. *Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л.* Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.
8. *Кренс В.Л.* О квадратичных формах, неотрицательных на ортанте // ЖВМиМФ. 1984. Т. 24. № 4. С. 497–503.
9. *Рапопорт Л.В.* Устойчивость по Ляпунову и знакоопределенность квадратичной формы на конусе // ПММ. 1986. Т.50. Вып. 4. С.674–679.
10. *Сухарев А.Г.* Глобальный экстремум и методы его отыскания // Математические методы в исследовании операций. М.: Изд-во МГУ. 1983. С.22–37.

Статья поступила в редакцию 04.02.2013.

УДК 544.722.1

ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ С ЭПОКСИДНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

П.А. СИТНИКОВ*, Ю.И. РЯБКОВ*, М.А. РЯЗАНОВ*, А.Г. БЕЛЫХ*,
И.Н. ВАСЕНЕВА*, М.С. ФЕДОСЕЕВ**, В.В. ТЕРЕШАТОВ**

*Институт химии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

**Институт технической химии УрО РАН, г. Пермь

sitnikov-pa@chemi.komisc.ru

Методом рК-спектроскопии проведено исследование кислотно-основных свойств поверхности полиморфных модификаций оксида алюминия (гиббсит, бемит, γ - Al_2O_3 , корунд). На основании 4рК-модели показано, что только для γ - Al_2O_3 и γ - $\text{AlO}(\text{OH})$ имеются кислотно-основные центры, описываемые уравнением: $-\text{Al}-\text{OH}_2^+ \leftrightarrow -\text{Al}-\text{OH} + \text{H}^+$ с $\text{pK}_1 \approx 4$. Методами ИК-Фурье-спектроскопии, ДСК, химического анализа проведено исследование физико-химических процессов, протекающих при введении в эпоксиполимерную матрицу полиморфных модификаций оксида алюминия. Показано, что γ - Al_2O_3 и γ - $\text{AlO}(\text{OH})$ за счет наличия более активных поверхностных групп с, являются наиболее реакционно-способными модифицирующими наполнителями эпоксидных олигомеров, вступая с ними в химические реакции.

Ключевые слова: адсорбция, кислотно-основные свойства, оксид алюминия, эпоксидные полимеры

P.A.SITNIKOV, YU.I.RYABKOV, M.A.RYAZANOV, A.G.BELYKH, I.N.VASENEVA, M.S.FEDOSEEV, V.V.TERESHATOV. **EFFECT OF ACID-BASE PROPERTIES OF THE SURFACE OF ALUMINA ON REACTIVITY WITH EPOXY COMPOUNDS.**

By the pK-spectroscopy method the acid-base properties of the surface of polymorphic modifications of alumina (boehmite, γ - Al_2O_3 , corundum) were researched. On the basis of 4pK-model it is shown that only for γ - Al_2O_3 and γ - $\text{AlO}(\text{OH})$ there are acid-base centers described by the equation: $-\text{Al}-\text{OH}_2^+ \leftrightarrow -\text{Al}-\text{OH} + \text{H}^+$ with $\text{pK}_1 \approx 4$. By methods of FTIR-spectroscopy, Differential Scanning Calorimetry, chemical analysis the research of physical and chemical processes proceeding at introduction of polymorphic modifications of alumina in epoxy-polymeric matrix was carried out. It is shown that γ - Al_2O_3 and γ - $\text{AlO}(\text{OH})$ at the expense of presence of more active surface groups c, are the most reactive-capable modifying fillers of epoxy oligomers, entering into a chemical reaction with them.

Key words: adsorption, acid-base properties, alumina, epoxy resins

Эпоксидные полимеры входят в число наиболее перспективных материалов как в России, так и за рубежом. Это обусловлено низкой стоимостью, широкой вариативностью технологических параметров, малой усадкой, высокой адгезионной способностью, высокими механическими свойствами и др. [1, 2]. При этом свойства эпоксидных полимеров можно легко регулировать как путем подбора состава системы эпоксидный олигомер - отвердитель, так и введением активных (модифицирующих) наполнителей. Активные наполнители способны существенно изменять эксплуатационные характеристики материалов – механическую прочность, теп-

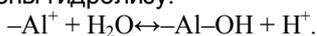
ло- и термостойкость, электропроводность за счет образования на границе раздела олигомер – твердая поверхность межфазного адсорбционного слоя [3]. Единого подхода, который позволял бы проводить оценку взаимодействия на межфазной границе, прогнозировать и регулировать такие взаимодействия, до сих пор не существует. На практике вопросы управления адгезионной способностью рассматриваются чаще всего путем эмпирической оптимизации рецептурно-технологических факторов, что не решает проблему в целом на научном уровне. В последнее время все большее внимание уделяется кислотно-основной природе

взаимодействия между полимером и наполнителем [4, 5].

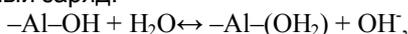
Наполнителями для полимерных матриц могут служить практически все существующие в природе и созданные человеком материалы, в том числе сами полимеры, после придания определенных свойств их поверхности. При выборе оптимального сочетания полимера и наполнителя учитываются не только природа частиц, форма, размер и характер их распределения в матрице, но и взаимодействия на границе раздела. Особое значение имеет реакционная способность наполнителей, являющаяся свойством их поверхности, непосредственно связанным с их функциональным химическим составом [6].

Оксиды металлов нашли широкое применение в качестве наполнителей термо- и реактопластов. В представленной работе в качестве модифицирующего наполнителя выбраны различные полиморфные модификации оксида алюминия, химия поверхности которых широко и всесторонне изучена [7–11].

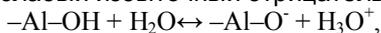
Известно, что алюмоокислородные связи подвержены гидролизу:



В результате дальнейшего гидролиза в средах, близких к нейтральной, поверхность Al_2O_3 может приобретать либо слабый избыточный положительный заряд:



либо слабый избыточный отрицательный заряд:



где $-Al$ – атом алюминия, который находится на поверхности.

Таким образом, на поверхности имеется набор кислотных и основных центров, причем каждый центр способен присоединять или отщеплять только один ион водорода, гидроксида или другой однозарядный ион.

Кислотно-основные свойства изучаемого материала удобно охарактеризовать с помощью метода рК-спектроскопии, описанном в работе [5]. рК-спектр представляет собой гистограмму, площадь отдельных полос которой равна вероятности того, что характеризующая данный кислотно-основной центр величина pK_i лежит в интервале между pK_i и $pK_i + \Delta pK$. Расчет рК-спектров проводится на основании экспериментальной кривой титрования, выражающей зависимость Гиббсовой адсорбции ионов водорода на изучаемой поверхности от рН раствора (в расчете на 1 г изучаемого образца):

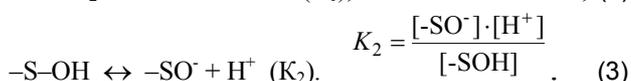
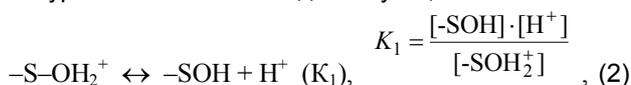
$$\begin{aligned} \Gamma(pH) &= n_b(pH) + n_H^0 = \\ &= \frac{c_{HA}V_0 - c_{BOH}V[H^+]}{m} \cdot (V_0 + V) + n_H^0, \text{ ммоль/г.} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь n_H^0 – количество ионов водорода (ммоль/г), которое адсорбировано на частицах твердой фазы суспензии в точке pH_0 , отвечающей равенству $n_b(pH_0)=0$. Величина $n_b(pH)$ рассчитывается из кривой потенциометрического титрования

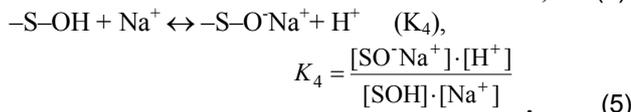
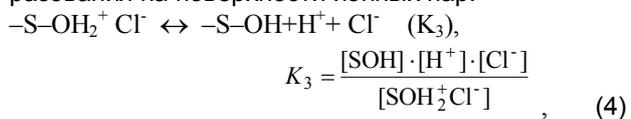
исследуемой суспензии, V_0 – объем суспензии, взятой для титрования, концентрация одноосновной сильной кислоты в которой равна C_{HA} , V – объем добавленной щелочи с концентрацией C_{BOH} , m – масса твердой фазы суспензии (г) во взятом образце. Концентрация ионов водорода в уравнении (1) рассчитывается из рН раствора по уравнению $[H^+] = 10^{pH}$.

Интерпретация кислотно-основных свойств оксидных материалов проводится в рамках концепции Дэвиса – Джеймса – Лекки на основе так называемых 2рК и 4рК-моделей.

В 2рК-модели предполагается, что заряд поверхности появляется в результате ионизации поверхностных амфотерных групп $-S-OH$ по следующим реакциям и описывается соответствующими им уравнениями закона действующих масс:



В тех случаях, когда константы K_1 и K_2 оказываются зависящими от концентрации фонового электролита, вместо модели 2рК используется модель 4рК. 2рК-модель – частный случай 4рК-модели, которая допускает возможность частичной нейтрализации поверхностного заряда ионами индифферентного электролита (например, $NaCl$), т.е. образования на поверхности ионных пар:



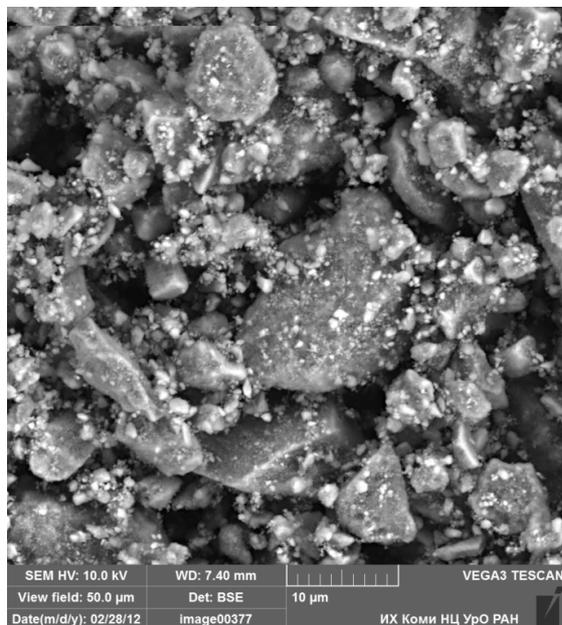
Очевидно, большие значения констант K_3 и K_4 соответствуют специфической адсорбции катионов, а малые значения – специфической адсорбции анионов [5].

Цель работы – исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности полиморфных модификаций оксида алюминия на химические процессы, протекающие при их введении в эпоксидные соединения.

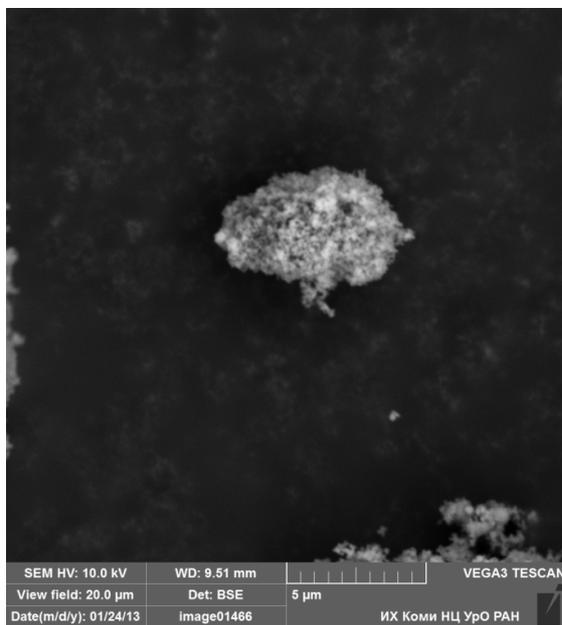
Объекты и методы исследования

В работе использовался оксид алюминия, полученный методом осаждения из раствора соли и плазмохимическим способом. В качестве исходного соединения для синтеза оксида алюминия использовали гидроксид алюминия, осажденный из концентрированного раствора нитрата алюминия гидроксидом аммония. С целью формирования различных полиморфных модификаций оксида алюминия его гидроксид прокаливался при температурах 300, 650, 1200 °С в течение 1 час., скорость подъема температуры 60 °С/час. По данным электронной

микроскопии (рис.1 а), размер зерен оксида алюминия, полученного при изотермической выдержке 650 °С в течение 1 час., варьируется от 20 мкм до 100 нм. Оксид алюминия, полученный плазмохимическим методом [12], прокаленный при температуре 1200 °С в течение 1 час., скорость подъема температуры 60 °С/ час. Для этого образца размер частиц оксида алюминия варьируется от 100 до 10 нм (рис. 1 б).



а)



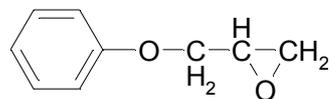
б)

Рис.1. Микрофотографии порошка оксида алюминия, полученного различными способами: а) методом осаждения из раствора соли; б) плазмохимическим методом.

По данным рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD -6000) после обжига при 1200° формируется фаза корунда ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Порошки оксида алюминия, прокаленные при 300, 650°С, и образец плазмохимического оксида алюминия являются рентгеноаморфными. По данным ИК-Фурье спектроскопии (ИК-Фурье спектрометр IR-Prestige-21), в этих образцах идентифицированы полосы поглощения, соответствующие фазам $\gamma\text{-AlO(OH)}$ (300 °С) и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (650 °С), плазмохимического оксида алюминия.

Наиболее распространенным методом изучения кислотно-основных свойств (в рамках концепции Бренстеда) оксидных материалов является потенциометрическое титрование их суспензий в водной среде. Использование неводных растворителей перспективно при изучении кислотно-основных свойств в рамках концепции Льюиса. Обычно титрование проводится из кислой области в щелочную (и наоборот) добавлением к суспензии, содержащей известную концентрацию свободной сильной кислоты $C_{НА}$, заданных алиquot щелочи с концентрацией $C_{ВОН}$ и измерением при этом рН дисперсионной среды.

Потенциометрическое титрование осуществлялось в полипропиленовых стаканах. Для предотвращения влияния растворенного углекислого газа титрование проводилось в среде аргона. В качестве модельного соединения для изучения процессов, протекающих при раскрытии эпоксидного цикла, выбран фенилглицидиловый эфир (ФГЭ):



который имеет только один вид функциональных групп – эпоксидные, что упрощает исследование взаимодействия функциональных групп на поверхности наполнителя с эпоксидным олигомером.

Результаты и обсуждение

Типичные зависимости $n_b(pH)$, рассчитанные из кривых прямого и обратного потенциометрического титрования суспензии, показаны на примере оксида алюминия, полученного плазмохимическим методом (см. рис. 2). Из него видно, что титрование обратимо, следовательно, образцы в процессе титрования щелочью практически не изменяются. Обратимость титрования означает, что при титровании щелочного раствора кислотой и кислого раствора щелочью получают одинаковые значения рН, в результате чего кривые прямого и обратного титрования совпадают. Из этого следует, что титрование не вызывает необратимых изменений образца.

На рисунках 3–7 представлены рК-спектры полиморфных модификаций оксида алюминия, полученных различными методами.

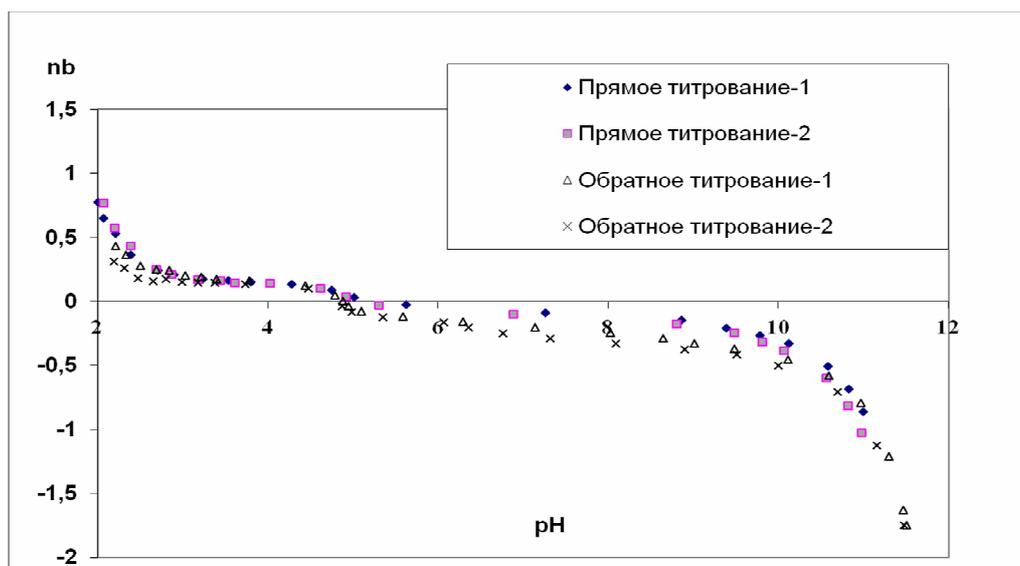


Рис.2. Зависимость относительной адсорбции ионов водорода на поверхности Al_2O_3 , полученного плазмохимическим методом, от pH.

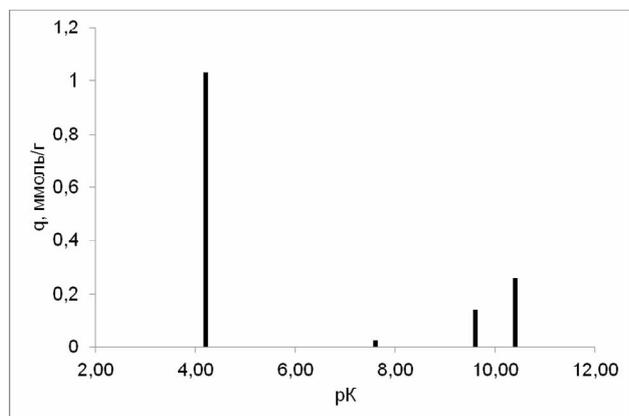


Рис. 3. pH-спектр $\gamma-AlO(OH)$, полученного при прокаливании гидроксида алюминия (изотермическая выдержка 300 °С).

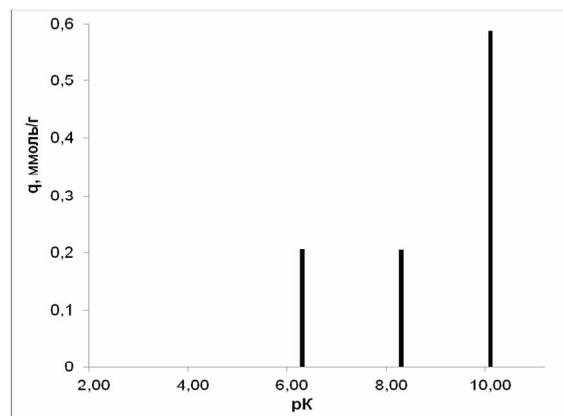


Рис. 5. pH-спектр $\alpha-Al_2O_3$, полученного при прокаливании гидроксида алюминия (изотермическая выдержка 1200 °С).

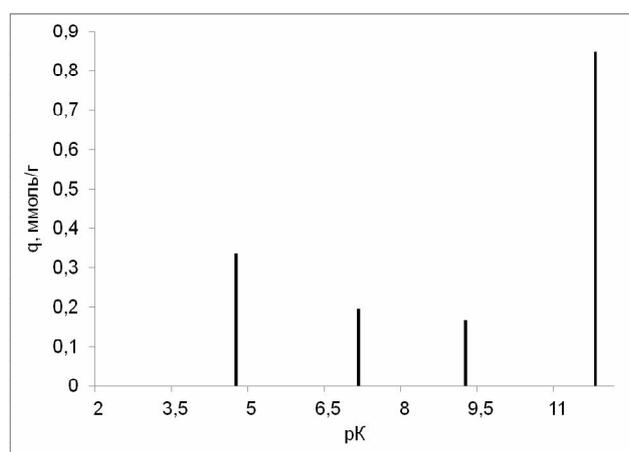


Рис. 4. pH-спектр $\gamma-Al_2O_3$, полученного при прокаливании гидроксида алюминия (изотермическая выдержка 650 °С).

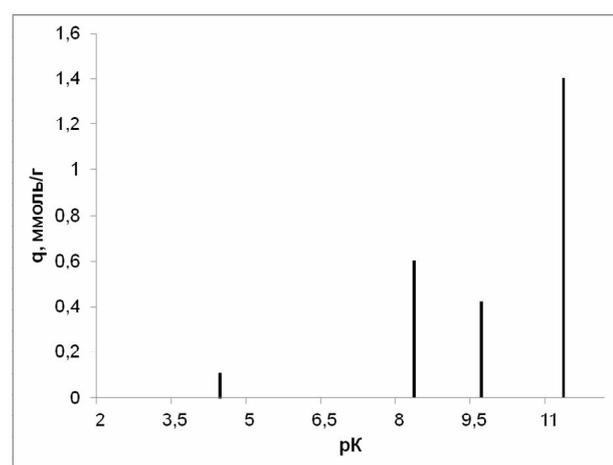


Рис. 6. pH-спектр $\gamma-Al_2O_3$, полученного плазмохимическим методом.

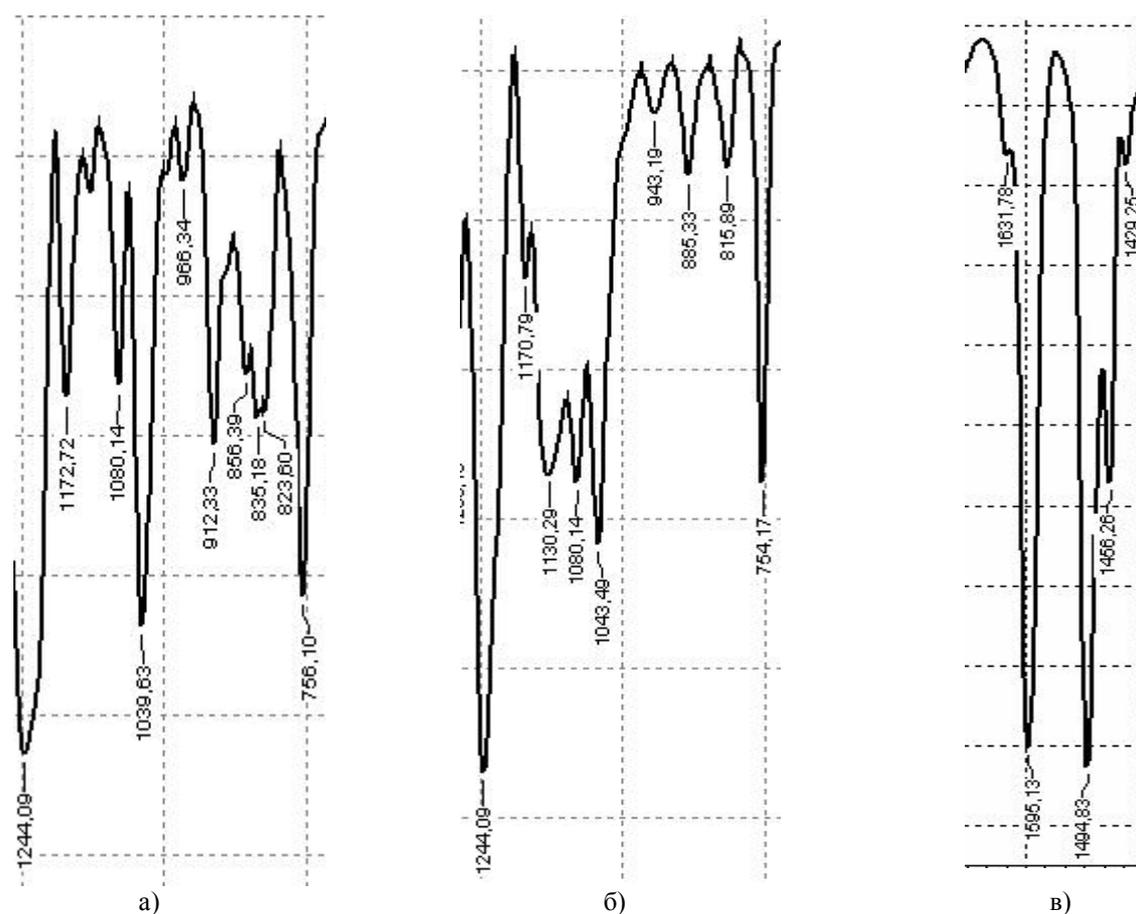


Рис.9. Фрагменты ИК-спектров системы ФГЭ - γ - Al_2O_3 : а) до нагрева; б) после нагрева до 120°C/60 мин; в) фрагмент ИК-спектра системы ФГЭ - γ - Al_2O_3 (плазмохимический метод).

б) в случае γ - Al_2O_3 – протекает преимущественно гомополимеризация фенилглицидилового эфира.

В результате структурных изменений при переходе из γ - Al_2O_3 в α - Al_2O_3 активность поверхности понижается, поэтому при нагревании системы ФГЭ - α - Al_2O_3 заметных изменений в спектрах не наблюдается, и интенсивности пиков спектра относительно друг друга остаются без изменений.

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии изучены тепловые эффекты процесса поликонденсации эпоксидианового олигомера ЭД-20 с изо-метилтетрагидрофталевым ангидридом в присутствии активных добавок – оксидов алюминия различных полиморфных модификаций.

Тепловые эффекты, наблюдаемые при поликонденсации эпоксидного олигомера с изо-МТГФА в присутствии модификаторов

Модификатор	$T_{\text{начала}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{конечная}}, ^\circ\text{C}$	$Q, \text{ Дж/г}$
-	95	140	165	247
γ - $AlO(OH)$	85	120	160	257
γ - Al_2O_3 (метод осаждения)	55	105	125	316
γ - Al_2O_3 (плазмохим. метод)	50	105	125	325
α - Al_2O_3	90	130	160	253

Введение в исходную олигомерную композицию оксидов, у которых относительно более активная поверхность, приводит к увеличению экзотермического пика отверждения эпоксидного олигомера. Из данных таблицы видно, что γ - $AlO(OH)$ и α - Al_2O_3 изменяют температуру начала реакции поликонденсации незначительно, а γ - Al_2O_3 понижает температуру начала реакции на 40°C, также повышается величина экзотермического эффекта отверждения.

На рис. 10 представлены результаты химического анализа определения количества эпоксидных групп в зависимости от температуры и времени выдержки для модельной системы фенилглицидиловый эфир (ФГЭ) - γ - Al_2O_3 (50:50). Из рисунка видно, что химическое взаимодействие между гидроксильными и эпоксидными группами с раскрытием эпоксидного кольца значительно ускоряется при повышенных температурах; при выдержке в течение 2 час при температуре 160°C эпоксидные группы в системе исчезают практически полностью.

Графическим методом определено, что реакция взаимодействия активных центров на поверхности оксида алюминия с эпоксидными группами имеет второй порядок (рис.11). Для реакций второго порядка характерна линейная зависимость обратной концентрации от времени и константа скорости равна тангенсу угла наклона прямой к оси

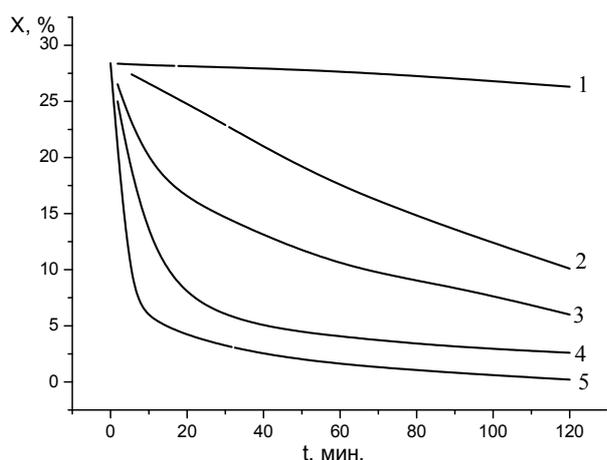


Рис.10. Изменение количества эпоксидных групп в системе ФГЭ - γ - Al_2O_3 от температуры и времени реакции (1 – при 20°C, 2 – при 80°C, 3 – при 100°C, 4 – при 120°C, 5 – при 160°C).

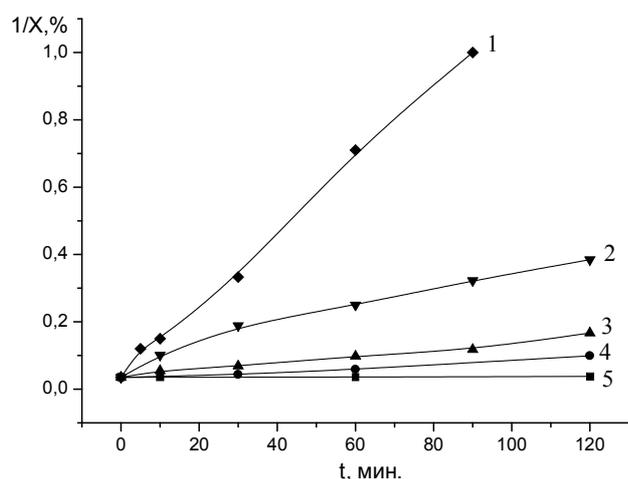
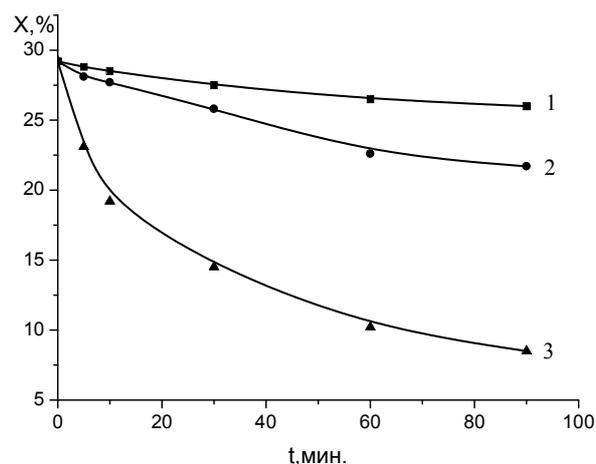
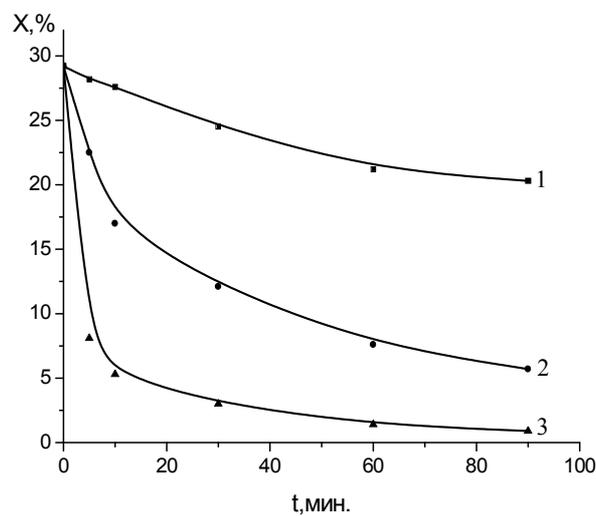


Рис. 11. Зависимость обратной концентрации эпоксидных групп в системе ФГЭ - γ - Al_2O_3 от времени (1 – при 160°C, 2 – при 120°C, 3 – при 100°C, 4 – при 80°C, 5 – при 20°C).



а)



б)

Рис. 12. Зависимость концентрации эпоксидных групп от времени реакции и содержания оксида алюминия в системе ФГЭ - γ - Al_2O_3 при 100°C (а) и при 160°C (б). (1 – 5 масс.%, 2 – 25 масс.%, 3 – 50 масс.%)

времени. Кинетическое уравнение реакции второго порядка:

$$k_t = 1/t * (C_0 - C)/C_0C.$$

Константы скорости реакции при разных температурах равны:

$$k_{20} = 2 * 10^{-5} (C^{-1})$$

$$k_{80} = 4 * 10^{-4} (C^{-1})$$

$$k_{100} = 1 * 10^{-3} (C^{-1})$$

$$k_{120} = 4 * 10^{-3} (C^{-1})$$

$$k_{160} = 1,2 * 10^{-2} (C^{-1}).$$

На рис. 12 представлены зависимости изменения эпоксидных групп в системе ФГЭ - γ - Al_2O_3 при 100 и при 160°C от содержания оксида алюминия. Наблюдается значительное повышение скорости

реакции поликонденсации при увеличении количества оксида алюминия, т.е. при увеличении площади граничного слоя.

Энергия активации процесса взаимодействия ФГЭ с γ - Al_2O_3 была определена по двум температурам на кинетической кривой по следующему уравнению:

$$- E_a/R = (\ln H_1 - \ln H_2) / (1/T_1 - 1/T_2)$$

$$- E_a/R = (\ln 54,5 - \ln 8,3) / (1/(113+273,2) - 1/(93+273,2)) = -13307,84$$

$$E_a = 110,63 \text{ кДж/моль.}$$

Заключение

Проведено исследование химического взаимодействия между фенилглицидиловым эфиром

(ФГЭ) в зависимости от кислотно-основных свойств полиморфных модификаций и предыстории оксида алюминия. γ - Al_2O_3 и γ - $\text{AlO}(\text{OH})$ за счет наличия более активных поверхностных групп с $pK_1 \approx 4$, по сравнению с α - Al_2O_3 , являются более реакционно-способными модифицирующими наполнителями эпоксидных олигомеров, вступая с ними в химические реакции. Выявлена двустадийность процесса – непосредственно химическое взаимодействие ФГЭ с гидроксильными группами, находящимися на поверхности оксида алюминия и гомополимеризация фенилглицидилового эфира, инициированная поверхностно-активными центрами оксида алюминия. Графическим методом определена энергия активации процесса взаимодействия ФГЭ с γ - Al_2O_3 , которая составила 110,63 кДж/моль. Установлено, что γ - Al_2O_3 понижает температуру начала реакции поликонденсации эпоксициановых олигомеров с изо-метилтетрагидрофтальевым ангидридом на 30 – 40 °С.

Работа выполнена при поддержке программ фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 12-33-004-АРКТИКА, 12-У-3-1017 и 12-И-3-2005.

Литература

1. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
2. Пакен А.М. Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы. Л., 1962. 963 с.
3. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: Уч.-справоч. Пособие. СПб: Изд-во «Профессия», 2003. 240 с.
4. Starostina I.A., Stoyanov O.V., Makhrova N.V., and Deberdeev R.Ya. A New Approach to Determination of the Acid and Base Parameters of the Surface Free Energy of Polymers // Dokl. Phys. Chem. 2011. Vol.436. Part 1. P. 8–9.
5. Рязанов М.А. Кислотно-основные свойства поверхности оксидных материалов // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2011. Вып. 2(6). С. 25–29.
6. Baldan A. Review of adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment//J. of Mater. Sc., 2004. 39. P. 1– 49.
7. Morterra C., Magnacca G. Structural, morphological and surface chemical features of Al_2O_3 catalyst supports stabilized with CeO_2 // J. Chem. Soc., Faraday Trans., 1996. Vol. 92. P. 5111.
8. Голикова Е.В., Иогансон О.М., Федорова Т.Г., Чернобережский Ю.М. Электроповерхностные свойства и агрегативная устойчивость водных дисперсий γ - Al_2O_3 , α - Al_2O_3 и γ - $\text{AlO}(\text{OH})$ // Поверхность. Физика, химия, механика. 1995. № 9. С. 78–89.
9. Химия привитых поверхностных соединений / Под ред. Г.В. Лисичкина. М.: Физматлит, 2003. 592 с.
10. Рязанов М.А., Дудкин Б.Н. Использование рК-спектроскопии для изучения кислотно-основных свойств золь гидратированного оксида алюминия // Коллоидный журнал. 2004. Т. 66. № 6. С. 807–810.
11. James R.O., Parks G.A. Characterization of aqueous colloids by their electrical double-layer and intrinsic surface chemical properties // Surface and Colloid Science, 1982. Vol. 12. P. 116–216.
12. Сафронов А.П., Калинина Е.Г., Смирнова Т.А. и др. Самостабилизация водных суспензий наночастиц оксида алюминия, полученных электровзрывным методом // Журнал физической химии. 2010. Т. 8. № 12. С. 1–6.
13. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.

Статья поступила в редакцию 03.11.2013.

УДК: 631.48(470.13)(211.7)

ОСОБЕННОСТИ АВТОМОРФНОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В ЛАНДШАФТАХ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ

Г.В. РУСАНОВА, О.В. ШАХТАРОВА

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
olga.shakhtarova@mail.ru*

Исследованы криометаморфические (неоглеенные) почвы и глееземы (профильно-глеевые) автоморфных ландшафтов юго-востока Большеземельской тундры (мезо-микроморфология, аналитические показатели). Установлены особенности структурной организации, интенсивность криогенных и педогенных процессов, унаследованные признаки. Показано, что дифференциация профилей почв обусловлена особенностями голоценовой эволюции ландшафтов.

Ключевые слова: криометаморфические почвы, глееземы криотурбированные, мезо-микроморфология, криогенные и педогенные процессы

G.V. RUSANOVA, O.V. SHAKHTAROVA. PEDOGENESIS IN AUTOMORPHIC LANDSCAPES OF BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA

Cryometamorphic (non-gleyic) soils and gleezems (profile-gleyic) of automorphic landscapes of the southeast of Bolshezemelskaya tundra (mezo-micromorphology, analytical indicators) are studied. Structural organization properties, cryogenic and pedogenic processes intensity, inherited signs are established. It is shown that the differentiation of soils profiles is caused by peculiarities of Holocene evolution of landscapes.

Key words: cryometamorphic soils, gleezems, meso-micromorphology, cryogenic and pedogenic processes

Автоморфные условия почвообразования не предполагают развития оглеения за счет длительного грунтового или поверхностного переувлажнения и дополнительного поступления влаги. На юго-востоке Большеземельской тундры автоморфные почвы – криометаморфические (неоглеенные) почвы, глееземы криометаморфические (поверхностно-глеевые) и глееземы типичные (профильно-глеевые) формируются на покровных пылеватых суглинках. На Государственной почвенной карте (лист Q-41, Воркута) тип криометаморфических почв не нашел отражения. Остальные названы тундровыми поверхностно-глеевыми в комплексе с остаточными поверхностно-глеевыми пятнами и болотно-тундровыми торфянисто-глеевыми, занимающими менее дренированные позиции в сочетании с вышеназванными комплексами [1]. Скрыто-глеевые почвы (при отсутствии признаков оглеения до 50–80 см) еще на ранних этапах исследования обнаружены Е.Н. Ивановой и О.А. Полынцевой [2]. Согласно авторам, более уплотненный поверхностный слой может быть окисленным бывшим глеевым горизонтом. Формирование скрыто-глеевых почв на пятнах межбугорковых участков, образованных в результате морозного выветривания бугорков, происходит в наиболее дренированных условиях (греб-

ни холмов, бровки склонов). Образование неглевых почв (криоземов) на северо-востоке страны связано с экстроконтинентальным климатом [3] и наблюдается до Новой Земли [4]. В европейской тундре в отделе неглевых криометаморфических почв выделены четыре типа [5], а позднее – один – криометаморфический [6]. Установлено, что в южной тундре эти почвы занимают 24–39% поверхности на вершинах холмов и формируются в комплексе с глееземами криометаморфическими [7].

В формирующихся на плоских дренированных поверхностях рельефа глееземах Ямала, Гыдана и юго-востока Большеземельской тундры оглеение является одним из ведущих почвообразующих процессов автоморфного почвообразования [8]. Этот процесс как ведущий в автоморфных условиях имеет место лишь в тундре и лесотундре, где глеегенез может сочетаться с процессами восстановительно-окислительной дифференциации железа и криогенного метаморфизма.

На пологих и плоских вершинах водоразделов, в пятнистых и бугорковых тундрах под кустарничково-моховой растительностью при близком залегании мерзлоты профильное оглеение не связано с дополнительным внутрпочвенным или поверхностным поступлением влаги, а согласно ряду

авторов [9, 2, 10], вызвано надмерзлотным увлажнением, слабой испаряемостью и заторможенностью биохимических процессов.

Эволюция голоценовых почв Субарктики связана с изменениями биоклиматических условий. В течение голоцена выделяют три интервала с теплыми климатическими условиями, когда лесные формации занимали тундру: раннебореальное, позднеатлантическое и среднесуббореальное потепления, главный из которых позднеатлантический. В течение атлантического времени (8–5 тыс. лет назад) южнотаежная растительность с примесью широколиственных пород была на большей части восточноевропейских тундр, а к позднеатлантическому времени зона тундры исчезла [11–14]. Амплитуда смещения растительных зон в голоцене составляла 3–4° [15].

Суббореальный период (5 тыс.–2 тыс. 200 л.н.) ознаменовался похолоданием в начале и потеплением в среднесуббореальную фазу, когда темнохвойные леса с участием широколиственных пород продвинулись на север. В конце суббореала распространилась ерниковая тундра, оставшаяся в I фазу субатлантического периода (2 тыс. 200–0 л.н.). Потепление во II фазе сменялось на похолодание в III фазу, ерниковая тундра простиралась севернее широтного колена Печоры [16]. В последнюю фазу (150–100 л.н.) сохранялись современные границы природных зон.

Формирование полноразвитых почв связано с позднеатлантическим этапом голоцена. Современные профили унаследовали признаки теплых и холодных этапов голоцена. По мнению Н.Г. Обермана [17], нынешние автономные позиции на междуречьях представляют древние озерные депрессии, осушаемые с конца позднего плейстоцена и по настоящее время. Происходившие еще в раннем голоцене термокары и озерная трансгрессия обусловили расчленение поверхности и процессы формирования автоморфных элювиальных ландшафтов вместо грунтово-глеевых. Считается, что охристые пятнистые профили глееземов – наследие древнеозерного периода, а глеевый диагностический горизонт как педолитогенный признак глееземов подвергается стиранию в ходе эволюции в современной криогидроморфной обстановке [18]. По нашему мнению, ослаблению глееобразования должны способствовать криопедотурбации, связанные с прохладными этапами эволюции почв и диагностируемые в современном профиле, а также типы морозной сортировки материала, структуры растрескивания, наличие и характер пористости и криогенного ожелезнения.

В настоящее время из автоморфных суглинистых почв наиболее обстоятельно изучены глееземы криометаморфические, занимающие промежуточное положение между криометаморфическими почвами и глееземами криотурбированными на вершинах и пологих склонах водораздельных увалов, широко использованные для сельскохозяйственного освоения. Ввиду недостаточной изученности генетических особенностей и главных процессов почвообразования криометаморфических почв

и глееземов типичных, целью данной работы является детальное исследование с использованием современных методов и подходов структурной организации и дифференциации твердофазных продуктов функционирования, криогенных и педогенных процессов и степени оксидогенеза.

Материалы и методы

Проведены исследования мезо-микроморфологии и анализ структурных компонентов криометаморфической почвы, формирующейся в бассейне р.Уса (лесотундра), в 50 км к юго-западу от г.Воркута, в окрестностях ж.-д. станции Сейда, в пятнисто-мелкобугорковой ерnikово-кустарничково-лишайниковой тундре. Профиль: О(0–5 см) – CRM₁(5–12 см) – CRM₂(12–27 см) – CRM₃(27–45 см) – CRMg(45–70 см). Почва до глубины 50 см не дифференцирована по гранулометрическому составу, средние суглинки с 50 см подстилаются супесчаными отложениями.

В качестве объектов послужили также глееземы криотурбированные, формирующиеся на слабосклоненном наветренном склоне увала, в окрестностях г. Воркута (Аяч-Яга), в бугорковой тундре с ивняково-ерниковым кустарничково-моховым покровом и залеганием мерзлоты на глубине 90 см. Профиль почвы: О(0–7 см) – Т(7–14 см) – Вh(14–15 см) – G₁(15–26 см) – G₂(26–38 см) – G₃(38–65 см). Перемешивание материала криотурбациями, переработанность органогенных турбированных горизонтов вмещающей минеральной массой формируют темно-бурые гумусированные линзовидные компоненты преимущественно в нижних горизонтах профиля. Коричневые затеки наблюдаются с глубины 12 см.

Комплексный подход к исследованию почв включает: а) анализ структурной организации и дифференциации продуктов функционирования (кутанный комплекс) на монолитах ненарушенного строения с применением мезо-микроморфологического метода; б) определение признаков криогенеза; в) выявление ведущих профилеобразующих процессов на основе физико-химических анализов почв.

Результаты исследований

Криометаморфическая почва. Описание мезоморфологии.

О 0–5 см. Темно-бурая рыхлая подстилка, лучше разложившаяся на границе с минеральной толщей и образованием грубогумусовой прослойки.

CRM₁ 5–12 см. Бурый, рассыпчатый, с коричневатобурыми и белесыми осветленными пятнами. Агрегаты 3–5 мм в диаметре, угловатые и округлые, с белесыми тонкими скелетанами и бурыми матовыми пленками на поверхности. В изломе педа светло-бурого цвета заметны тонкие внутриведные трубчатые поры диаметром < 1 мм, белесые пятна скелетан.

CRM₂ 12–27 см. Светло-бурый, рассыпчатый; пятна коричневатобурые и белесоватобурые. Размер агрегатов коричневатобурых пятен 5–7 мм, толщина 5 мм; на матовой бурой поверхности –

пятна более толстых, чем в вышележащем горизонте, белесоватых скелетан (1–2 мм). Излом педа – светло-бурый, заметны черные точки (конкреции) и трубчатые поры, а также отдельные коричневые пятна (пропитка Fe-органическими соединениями). Субгоризонтальное залегание скелетан, занимающих межпедные промежутки. Белесые участки характеризуются слоеватым сложением, меньшим размером толщиной 1–2 мм, а по длинной оси – 7 мм и пластинчатой формой агрегатов, обилием скелетан, обуславливающих более сильную рассыпчатость этих участков. Толщина скелетан на верхних поверхностях агрегатов 1–2 мм, на нижних – пятнами. Очень тонкие поры и черные точки.

CRM₃ 27–45 см. Светло-бурый, с отдельными темновато-бурыми пятнами, иногда в виде ореола вокруг пор. Единичные корни. Размер агрегата-5x8 мм, толщина 5 мм. Форма округло-овальная, округло-угловатая. Скелетаны, слоем толщиной 1–3 мм на верхней поверхности, покрывают агрегат и заполняют внутривпедные поры. Иногда на стенках пор – бурая пленка. Внутривпедная масса светло-бурая, местами с ожелезненными зонами. Диаметр трубчатых пор ≈ 1 мм. Отмечается слоеватое сложение, субгоризонтальное залегание скелетан.

CRM₄ 45–70 см. Светло-бурый, плотнее гор. CRM₂. Корни. Структура угловато-крупитчатая; скелетаны буроватого оттенка, более тонкие и менее распространенные. Тонкая пористость. Темновато-бурые участки характеризуются отчетливой зернистой структурой. Мелкие трубчатые поры пронизывают педы. Размер первичного педа 5x3 мм, толщина – 2 мм. Цвет излома педа светло-бурый, с мелкими черными, ржавыми точками (конкреций). В верхней части горизонта конкреции размером 3x4 мм, окаймленные белесой пленкой толщиной ≈ 1 мм. Белесые скелетаны ясны вблизи трещин. На межтрещинной части – поверхности агрегатов с белесыми пятнами. Нижняя часть горизонта более уплотненная, массивная, темнее по цвету. Осветленные белесые скелетаны отсутствуют. Появляется темно-бурое окаймление пор и бурые пятна на поверхности агрегатов. Размер первичных агрегатов несколько меньше. Трубочатые поры диаметром ≈ 1 мм.

Белесоватые пятна, отличающиеся слоеватым сложением, находимые в гор. CRM₁, могут быть фрагментами подзолистого горизонта. Об этом же свидетельствуют белесые пятна во внутривпедной массе. Профиль почвы достаточно хорошо агрегирован. Размер агрегатов возрастает, начиная с гор. CRM₁ (от 3x5 мм до 5x8 мм), тогда как нижняя часть профиля (60–70 см) становится массивной, слабее агрегированной, в связи с утяжелением гранулометрического состава, длительным промерзанием, задержкой воды в этой части профиля. Отдельные белесые тонкие скелетаны верхней части профиля (г. CRM₁) сменяются на их обилие в горизонтах ниже, где толщина возрастает до 1–3 мм. Скелетаны заполняют межпедные промежутки и внутривпедные поры. В нижней части профиля они аккумулярованы лишь вблизи трещин или сосредоточены небольшими пятнами на поверхности агре-

гатов; появляется темно-бурое окаймление пор. Анализ профильного распределения песчано-пылеватых кутан показывает более высокое расположение последних в профиле данной почвы, тогда как в оглеенных (глееземы криометаморфические) оно ниже. В нижней части профиля почвы фиксируются ожелезненные зоны, ржавые точки во внутривпедной массе.

Отсутствие морфологически выраженного гор. G и бурая окраска почвы, а также чешуйчатый характер плазмы, обнаруживаемый в микростроении, сближают эти почвы с буроземами (бурые кислые грубогумусовые), обнаруженными на Приполярном [19] и Полярном [20] Урале. Криогенный характер агрегации и наличие грубогумусового губчатого слоя над минеральной толщей позволяют отнести почву к отделу криометаморфических. Согласно В.Д. Тонконогову [8], эти почвы до верхней границы мерзлоты (45 см) не дифференцированы по гранулометрическому, валовому составу и содержанию Fe, переходящего в дитионит-, и оксалатные вытяжки. Описанные Е.Н. Ивановой и О.А. Польшинцевой [2] почвы пятен также не дифференцированы и не оглеены до 50 см.

Продолжающиеся циклы промерзания-протаивания, придающие специфические признаки почвам, обуславливают криогидратационное выветривание, дробление частиц до пылеватого размера [21], а также ротационную агрегацию тонкодисперсного материала вследствие склеивания гидроксидами Fe, освобождающимися при выветривании. Тем самым формируются признаки криометаморфических горизонтов (ооиды, гранулярные агрегаты). Имеет также место сегрегационно-коагуляционное оструктурирование частиц разного гранулометрического состава при участии гумуса, соединений Fe, хорошо заметное в криометаморфических горизонтах. Вследствие криогенной сортировки частиц наблюдаются скопления скелетан на поверхности агрегатов, а с криогенным механизмом массопереноса связаны перераспределение внутри профиля, аккумуляции в межагрегатных трещинах и внутриагрегатных порах в виде тонкодисперсного темно-бурого окаймления и заполнения белесыми скелетанами. Следует отметить также фрагментирование и трансформацию органического вещества. Криогенные процессы, наиболее четко выраженные в данном профиле: агрегация, сегрегационно-коагуляционное оструктурирование; сортировка частиц.

Как показали анализы структурных компонентов (табл.1), наблюдается аккумуляция оксалат- и дитионит-растворимых R₂O₃ (особенно дитионит-растворимого Fe) в скелетанах (песчано-пылеватых кутанах) верхней части минеральной толщи почвы (гор. CRM₁). Описание мезоморфологии обнаруживает здесь коричневатобурые зоны и бурые матовые покрытия на поверхности агрегатов, где в форме органо-минеральных соединений осаждаются R₂O₃. Коллоидные частицы гидроксидов Fe адсорбционно или химически связывают анионы фульвокислот. Продуцируемые в процессе трансформации подстилки подвижные органические со-

Содержание подвижных R_2O_3 , С и N в структурных компонентах, %

Горизонт	Глубина, см	Структурный компонент	По Тамму		Fe_2O_3 по Мера-Джексону	С	N	C/N	Степень оксидогенеза, общая масса почвы
			Fe_2O_3	Al_2O_3					
Криометаморфическая почва									
CRM ₁	5-12	Скелетаны	0.30	0.16	0.85	0.17	0.02	8	0.3
		ВПМ	0.32	0.18	0.75	0.20	0.03	7	
CRM ₂	12-27	Скелетаны	0.22	0.10	0.43	0.22	0.02	11	0.4
		ВПМ	0.45	0.20	0.50	0.27	0.03	9	
CRM ₃	27-45	Скелетаны	0.25	0.11	0.45	0.21	0.03	7	0.4
		ВПМ	0.42	0.18	0.79	0.21	0.03	7	
CRM ₄	45-70	Скелетаны	0.23	0.11	0.33	0.18	0.02	9	0.4
		ВПМ	0.22	0.22	0.72	0.24	0.03	8	
Глеезем криотурбированный									
Bh	10-15	ОМ	0.17	1.03	0.45	0.53	0.05	10	0.2
G ₁	15-25	- « -	0.21	0.68	0.47	0.74	0.07	10	0.2
G ₂	25-35	- « -	0.18	1.01	0.36	0.35	0.04	9	0.2
G ₃	35-40	- « -	0.19	1.08	0.39	0.24	0.03	8	0.2
- « -	40-65	- « -	0.15	0.96	0.29	0.28	0.04	7	0.2
Bh	10-15	ВПМ	0.18	1.16	0.47	0.18	0.03	6	не опр.
G ₁	15-25	- « -	0.19	0.73	0.51	0.17	0.03	6	не опр.
G ₂	25-35	- « -	0.20	1.06	0.37	0.18	0.03	6	не опр.
G ₃	35-40	- « -	0.21	1.08	0.40	0.24	0.04	6	не опр.
- « -	40-65	- « -	0.20	1.09	0.39	0.30	0.04	7	не опр.

Примечание. ОМ – общая масса; ВПМ – внутрипедная масса.

единения, не связанные с R_2O_3 , мигрируют вниз по профилю, в несколько большей степени аккумулируясь в скелетанах и ВПМ (внутрипедная масса) нижележащего гор. CRM₂. В этом же горизонте происходит некоторая аккумуляция оксалат-растворимых R_2O_3 в ВПМ почвы. Темно-бурые, коричневые пятна во внутрипедной массе этого горизонта, в том числе вдоль внутрипедных пор, иллюстрируют осаждение мигрировавших, очевидно, в более ранние фазы педогенеза, фульвокислот и R_2O_3 .

Обеднение осветленных пятен (гор. CRM₁) валовыми оксидами Fe, Al и некоторое увеличение их содержания в гор. CRM₂, а также накопление SiO_2 в этих пятнах и уменьшение с глубиной (гор. CRM₂) отмечено для р.8-ПА криометаморфической почвы В.Д. Тонконовым [8]. Анализы подвижных R_2O_3 и углерода в ВПМ исследованной нами почвы (табл.1) также выявили элювиально-иллювиальный характер дифференциации. Следовательно, процесс Al-Fe-гумусового подзолообразования в криометаморфической почве, проявляю-

щийся при валовом анализе общей массы почвы [8] и анализе внутрипедной массы (табл.1), унаследован от прошлых стадий почвообразования. Процесс Al-Fe-гумусового иллювиирования достаточно четко диагностируется анализами скелетан. Поскольку последние приурочены к границе раздела фаз миграционным путям, можно предположить, что данный процесс имеет место в настоящее время.

Окрашивание профиля в бурый цвет связано с внутрипрофильной миграцией С и R_2O_3 . Органическое вещество обогащено азотом (С:N = 6-11), что свидетельствует о высокой интенсивности биологического круговорота, как и в буроземных оподзоленных [20] Полярного Урала. Анализы скелетан четко отражают процесс Al-Fe-гумусового иллювиирования, подтверждаемый наличием бурых пленок на поверхности агрегатов в гор. CRM₁, непосредственно под гор.О. Очевидно, на ранних этапах почвообразования более интенсивно протекали процессы Al-Fe-гумусового подзолообразования, которые диагностируют анализы внутрипедной массы и

валовые анализы почв. На поздних этапах ведущими являются процессы Al-Fe-гумусового иллювиирования, диагностируемые анализами скелетан. Небольшое количество конкреций в виде черных точек свидетельствует о процессах сегрегации в данной почве, имевших место и в прошлые этапы развития, а окаймление их в нижней части профиля белесой пленкой – о заметном влиянии криогенных процессов на сегрегированные ранее формы Fe.

Оксидогенез, или новообразование оксидов Fe, химически или сорбционно связанных с фульвокислотами, различным образом проявляется в почвах криолитозоны, абсолютно преобладая в зимний период [22]. Определение степени развития оксидогенеза (критерий Водяницкого - *Fe по Джексону*) выявило среднюю степень этого

Fe валовое

показателя, что свидетельствует в целом о благоприятном состоянии для структурообразования, появления рассыпчатости, крупитчатой структуры (табл.1). Таким образом, в качестве главных почвообразующих процессов следует отметить аккумуляцию и внутривертикальную миграцию подвижных органических кислот, Al-Fe-гумусовое иллювиирование и криогенные процессы, накладывающиеся на почвенные. По всем диагностическим показателям почва относится к криометаморфическим (O-CRM-C).

Глеезем криотурбированный. Описание мезоморфологии.

O	0–7см	Очес гипновых мхов.
T	7–14 см	Темно-серый, торфянистый, хорошо разложившийся в нижней части.
Bh	14–15 см	Темно-бурый слой зернистой структуры на границе с минеральной толщей.
G ₁	15–25 см	Светло-бурый (в сухом состоянии), с темно-бурыми пятнами в самой верхней части. По ходам корней отмечаются окисленные охристые участки, окрашенные гумусо-Fe соединениями. Отдельные трубчатые поры, заполненные белесой скелетаной. Диаметр пор ~ 1 мм. Выделяются охристые и осветленные зоны. Отмечается слабо выраженное субгоризонтальное сложение. Очень плотный, слитный, не агрегирован. Изредка мелкие темные конкреции. Охристые зоны по ходам корней и белесые пятна.
G ₂	25–40 см	Светло-бурый, менее плотный, неоднородно окрашен: редкие охристые мелкие округлые пятна и белесое заполнение округлых трубчатых пор. Конкреции единичны. Тонкопористый. Агрегированность слабо выражена, слитное сложение. Заметна творожистость (везикулярные поры), ноз-

древатость, характерная тиксотропным горизонтам. Редкие корни. Неоднородно окрашен: на светло-буром фоне – охристые пятна и темно-бурые полосы, изогнутые, волнистые – отдельными участками (криотурбации). Агрегаты угловатые, пронизаны округлыми порами с пылевато-глинистыми пленками. Много трубчатых конкреций.

G₃ 40–65см

Судя по описанию, профиль почвы в сухом состоянии слитный, очень плотный, не агрегирован. Слабая агрегация заметна лишь в нижней части. Пятнистость (охристые зоны) свидетельствует о процессах окисления Fe, имеющих место при высыхании почвы. Редкие белесые пятна скелетан и заполнения ими трубчатых пор характеризуют криогенную сортировку зерен скелета. Изогнутые темно-бурые фрагменты, обогащенные органическим веществом на глубине 40–60 см, являются следствием криотурбаций.

Анализ микростроения показывает, что для гор.Bh свойственна агрегированность биогенного и криогенного характера: мелкие растительные остатки с пылеватыми частицами и коагуляционные гумусовые сгустки, образующие округло-угловатые агрегаты. Фрагментарность растительных тканей и гумусо-глинистые пленки на зернах скелета являются следствием криогенных процессов. Компактный гор.G₁ отличается отсутствием агрегированности или очень редким проявлением, гумусо-глинистыми пленками на зернах, окисленными и восстановленными микроразностями. Свообразием гор.G₂ являются редкие глинистые пленки на зернах, микроразности с криотурбированным гумусом в нижней части, обособление агрегатов. Надмерзлотный гор.G₃ обнаруживает темные гумусовые микроразности.

Признаки криогенных процессов четко прослеживаются в данной почве. При близком залегании многолетней мерзлоты в пределах профиля (90 см) почва при высыхании становится слитной, без признаков агрегированности, или очень слабой в нижней части (гор.G₃). Твердые, устойчивые в сухом состоянии угловатые агрегаты в гор.G₃ образуются при механическом воздействии крупных линз льда при замерзании, так как эта часть почвы переувлажнена в летний период. Переувлажненность вызывает развитие криотурбаций вследствие термального сжатия мерзлого материала при быстром похолодании. Многочисленные везикулярные поры гор.G₂, образованные при медленном таянии и сохранении воздуха, способствуют образованию творожистого ноздреватого строения, характерного для тиксотропных горизонтов. Присутствие мерзлоты вызывает миграцию влаги вдоль термального градиента, перенос твердых частиц в виде суспензий наряду с криогенной сортировкой зерен скелета. Последние составляют белесое заполнение пор как в гор.G₂, так и выше (гор.G₁).

Слабо выраженное субгоризонтальное сложение в гор.G₁, обнаруживаемое в сухом состоянии, возникает вследствие циклов замерзания – от-

таивания и образования от линз льда листоватых, ленточных агрегатов, очень неустойчивых во влажные периоды в верхних горизонтах. Гранулярные агрегаты между торфянистым слоем и минеральной толщей образуются вследствие механического давления, ротации в сильно насыщенных водой средах [23, 24]. Во влагонасыщенных субстратах происходит вытеснение кристаллами льда тонкодисперсных частиц, которые с миграционными

части профиля (два слоя), но и в ряде случаев над мерзлотой, криогенно-ожелезненные прослойки ослабляют выраженность унаследованного массивного глея.

Почвы слабо дифференцированы по гранулометрическому [8] и валовому (табл.2) составу. Фиксируемые в результате криотурбационных процессов фрагменты органического вещества над мерзлотой отличаются от вышележащей минераль-

Таблица 2

Валовой химический состав почв, % от прокаленной навески

Горизонт	Глубина, см	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
Криометаморфическая [8]											
ELg (пятна)	5-15	72.90	2.78	11.74	0.99	0.80	0.72	1.48	2.10	0.09	93.79
CRM ₁	5-15	71.90	3.60	12.35	0.75	0.83	1.44	1.62	1.85	0.07	94.59
CRM ₂	15-27	72.10	3.58	11.77	0.76	0.98	1.36	1.63	2.54	0.07	94.99
CRM ₃	30-40	73.60	3.33	10.69	0.65	1.02	1.59	1.54	2.30	0.15	95.10
IICRMg	50-60	87.40	2.57	4.05	0.23	0.51	0.57	0.45	0.86	0.18	97.00
Глеезем криотурбированный											
Bh	10-15	72.0	5.34	13.57	0.88	1.35	1.10	2.20	не опр.	0.18	не опр.
G ₁	15-25	72.1	5.07	13.20	0.91	1.35	0.94	2.11	- « -	0.16	- « -
G ₂	25-35	72.6	5.37	13.24	0.91	1.36	1.02	2.18	- « -	0.17	- « -
G ₃	35-40	72.3	5.35	13.62	0.88	1.35	1.12	2.14	- « -	0.17	- « -
G ₃	40-65	72.9	5.43	13.11	0.93	1.36	0.96	2.12	- « -	0.16	- « -

потоками переносятся из талой зоны в мерзлую. Перенос вещества при криотурбации вызывает нарушение слоистости, появление линз, обогащенных органическим веществом.

Таким образом, криогенные процессы оказывают значительное влияние на почву: изменение физического объема при превращении воды в лед и обратно; термальное сжатие с образованием трещин при быстром промерзании; перенос, перераспределение вещества процессами криотурбации. Близкое залегание мерзлоты предполагает наличие в почве двух фронтов промерзания и преобладание физического перемещения вещества. Считается, что в глееземах криогенный массообмен достигает максимального развития [10].

В нижней части торфянистой органической прослойки фиксируются фрагменты иллювиально-гумусового горизонта, отличающегося буровато-коричневым цветом и хорошо выраженной икряной структурой. В некоторых случаях ниже лежащий горизонт максимального оглеения G₁ [8] может выделяться наличием признаков криогенного ожелезнения в виде охристой каймы сверху и снизу. Соответственно, наблюдается дифференциация профиля по валовому содержанию оксида Fe с минимумом в глеевом горизонте и максимумом в охристой кайме. Степень развития оксидогенеза (по Водяницкому) в таких почвах очень низкая (<0.25), заметно отличающаяся от криометаморфических почв (0.45-0.35). Следует отметить, однако, что в охристой кайме этот коэффициент составляет 0.4. Формируясь в глеевой толще не только в верхней

толщи несколько большим содержанием гуминовых кислот, связанных с Ca и снижением количества нерастворимого остатка [25]. Содержание углерода во внутрипедной массе почвы (табл.1) ниже, чем в общей массе [25], за исключением гор.G₃, где оно накапливается с Fe на мерзлотном барьере, образуя Fe-органические комплексы. Количество оксалат-растворимых форм Fe в общей и внутрипедной массе профиля глеезема (табл.1) почти одинаковое. При этом в распределении содержания в общей массе заметно повышение в гор.G₁ вследствие установления окислительно-восстановительного барьера и выпадения Fe в верхней части этого горизонта. С глубиной происходит уменьшение содержания. Профильное распределение оксалат-растворимого Fe, концентрированного в ВПМ, повторяет его распределение в общей массе почвы, несколько повышаясь с глубиной. Подобную же закономерность выявляют дитионит-растворимые формы как в общей, так и внутрипедной массе. Что касается оксалат-растворимого Al, его содержание несколько выше в ВПМ. Профильное распределение Al в этих компонентах почвы коррелирует с распределением углерода в общей массе почвы: аккумуляция в гор.Bh, уменьшение в верхней части глеевой толщи (гор.G₁) и равномерное распределение с глубиной. Формирование гор.Bh под органо-аккумулятивным слоем указывает на короткий путь миграции подвижных органо-минеральных соединений в этой почве, что объясняется условиями аэрации, увлажнения и непроницаемостью тиксотропного слоя. По валовому содержанию

Al дифференциации не происходит. Минимальное содержание Fe в гор. G₁ с одновременным некоторым увеличением оксалат- и дитионит-растворимых его форм связано с процессом криогенной восстановительно-окислительной железистой дифференциации [8]. Подтверждением являются темно-бурые пятна в верхней части гор. G₁ и охристые участки по ходам корней (гумусо-Fe соединения).

Ограничивающими факторами развития педогенных процессов и дифференциации профиля в глееземах криотурбированных являются: близость мерзлоты, ограничивающая нисходящий ток растворов; глеевая толща с ярко выраженными тиксотропными свойствами, являющаяся геохимическим барьером для элементов; нарушение дифференциации профиля криотурбациями. Формирующиеся в процессе трансформации подстилки органические соединения образуют зернисто-агрегированный слой на границе с минеральной толщей и темно-бурые пятна на ее поверхности.

Гранулярные агрегаты в этой части профиля являются следствием криогенных процессов, тогда как темно-бурые пятна, аккумуляции Al-гумусовых соединений непосредственно под органомным горизонтом – результат Al-Fe-гумусового иллювирирования. Одновременно наблюдаются охристые зоны по ходам корней, что отражает процессы криогенного ожелезнения или хемогенную дифференциацию оксида Fe в результате восстановительно-окислительных процессов: мобилизации двухвалентного Fe и аккумуляции его на окислительном барьере, вблизи фронта промерзания в верхней части профиля. Подобное явление впервые было отмечено Б.Н. Городковым [26] и отнесено к почвообразующим процессам В.Д. Тонконовым [8].

На основании вышеизложенного можно отметить основные особенности глееземов криотурбированных: 1) преобладание в почве длительных периодов восстановительных условий и оглеения, о чем свидетельствуют незначительное количество конкреций, слитность сложения верхней части; 2) максимальная выраженность в этих почвах криотурбаций, наряду с которыми имеют место перераспределение, сортировка компонентов и криокоагуляционная агрегация органического вещества на границе с минеральной толщей; 3) слабое развитие и изменение педогенными процессами почвенной толщи: Al-Fe-гумусовое иллювирирование, хемогенная дифференциация оксидов Fe, замедленная миграция продуктов функционирования; 4) формирование гор. Vh под органомным слоем, как и в почвах без диагностического гор. G, свидетельствующее об активизации педогенных процессов в ходе эволюции в верхней части глееземов; 5) сохранность унаследованных признаков: фрагменты глинистых кутан, гумусовые педореликты. Полученные результаты показывают, что в данный период эволюции происходит некоторое стирание унаследованных глеевых черт в палеогидроморфных почвах нынешних автоморфных неоэлювиальных ландшафтов.

Заключение

Исследование крайних представителей автоморфного почвообразования в южной тундре показало как сходство в протекающих процессах почвообразования и криогенеза, так и отличия, обусловленные различной энергетикой почвообразования. В криометаморфических почвах происходит формирование специфической структуры благодаря оксидогенезу, в ходе которого образуются оксиды Fe, которые связаны с органическим веществом, способствуют агрегированию почвы. В результате активизации оксидогенеза в этих почвах, особенно в процессе многократного промерзания и отсутствия избытка влаги, формируются криометаморфические горизонты, имеющие бурую окраску и особую структуру. В почве обнаруживается также процесс Al-Fe-гумусового подзолообразования, унаследованного от прошлых стадий развития.

Отличие глеезема от криометаморфической почвы заключается в развитии процесса криогенного ожелезнения, максимальном проявлении криотурбаций, ограничении педогенных процессов вследствие формирования тиксотропной глеевой толщи. Криотурбированные линзы над мерзлотой, содержащие гуминовые кислоты и связанные с Ca, свидетельствуют об унаследованности этих педореликтов от более ранних периодов почвообразования. А дифференциация профилей исследованных почв во многом обусловлена особенностями голоценовой эволюции ландшафтов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта №12-Т-4-1004 "Формирование и функционирование почв криолитозоны европейского Северо-Востока в условиях изменения климата и антропогенных воздействий" Программы ОНЗ РАН №14 "Состояние окружающей среды и прогнозы ее динамики под влиянием быстрых глобальных и региональных природных и социально-экономических изменений".

Литература

1. *Пояснительная записка к листу Q-41* (Воркута. Государственная почвенная карта России м-ба 1:1000000. Сыктывкар, 2011. 76 с.
2. *Иванова Е.Н., Полынцова О.А.* Почвы европейских тундр // Тр. Коми фил. АН СССР. Сер. геогр. Сыктывкар, 1952. Вып. 1. С. 73–122.
3. *Соколов И.А.* О разнообразном проявлении гидроморфного неглеевого почвообразования // Почвоведение. 1980. №2. С.5–18.
4. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера. М.: ТЕОС, 2010. 414 с.
5. *Классификация и диагностика почв России.* Смоленск: Изд. Ойкумена, 2004. 342 с.
6. *Полевой определитель почв России / Почв. ин-т им В.В. Докучаева.* М., 2008. 182 с.
7. *Пастухов А.В., Жангуров Е.В.* Основные черты почвенного покрова восточно-европейской тундры на суглинистых почвообразующих породах: Материалы Международной конф. «Пространственно-временная органи-

- зация почвенного покрова: теоретические и практические аспекты». СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2007. С.292–294.
8. *Тонконогов В.Д.* Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнины. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2010. 304 с.
 9. *Ливеровский Ю.А.* Почвы тундр северного края // Тр. Полярной комиссии. Л., 1934. Вып. 19. 112 с.
 10. *Игнатенко И.В.* Почвы восточно-европейской тундры и лесотундры. М.: Наука, 1979. 278 с.
 11. *Величко А.А.* Устойчивость ландшафтной оболочки и ее био- и георазнообразие в свете динамики широтной зональности // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 5. С.7–21.
 12. *Зубаков В.А., Борзенкова И.И.* Палеоклиматы позднего кайнозоя. Л., 1983. С.216.
 13. *Гуслицер Б.И., Дурягина Д.А., Кочев В.А.* Возраст рельефообразующих морен в бассейне нижней Печоры и граница распространения последнего покровного ледника // Расчленение и корреляция фанерозойских отложений европейского Севера СССР/ Труды Института геологии. Коми фил. АН СССР. Вып. 54. Сыктывкар, 1985. С.97–108.
 14. *Болиховская Н.С., Болиховский В.Ф., Климанов В.А.* Климатические и криогенные факторы развития торфяников европейского Северо-Востока СССР в голоцене // Палеоклиматы голоцена европейской территории СССР. М.: Изд-во ИГАН СССР, 1988. С.36–44.
 15. *Бердовская Г.Н.* Вопросы выраженности оптимумов межледниковий на палинологических диаграммах севера европейской части СССР // Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода севера европейской части СССР / Карельский филиал АН СССР. Петрозаводск, 1977. С.48–58.
 16. *Андреичева Л.Н., Марченко-Вагапова Т.И.* Развитие природной среды и климата в антропогене на Северо-Востоке Европы. Сыктывкар: Геопринт, 2003. 24 с.
 17. *Оберман Н.Г.* Палеомерзлотная и палеогеографическая информативность подземных льдов Печоро-Уральского региона: Международная конференция «Проблемы криологии Земли. Фундаментальные и прикладные исследования». Пущино: ОНТИ НЦБИ, 1997. С. 239–240.
 18. *Фоминых Л.А., Золотарева Б.Н.* Экологические особенности глееземов Российской Арктики // Почвоведение. 2004. № 2. С. 147–157.
 19. *Русанова Г.В., Кюхри П.* Почвы границы леса и горной тундры Приполярного Урала// Почвоведение. 2001. №4. С. 409–417. Rusanova G. V., Kuhry P. Pochvovedenie, 2001(4): 409-417. Translated by journal into English. Eurasian Soil Science, 2001(4): 363–370.
 20. *Дымов А.А., Загирова С.В., Марченко-Вагапова Т.Н.* Формирование еловых биогеоценозов на Полярном Урале // Лесоведение. 2011. № 5. С. 12–21.
 21. *Конищев В.Н., Рогов В.В.* Микроморфология криогенных почв и грунтов // Почвоведение. 1977. № 2. С.119–123.
 22. *Водяницкий Ю.Н.* Соединения Fe и их роль в охране почв. М.: ГНУ. Почвенный институт, 2010. 282 с.
 23. *Конищев В.Н.* Криогенное выветривание: Тез. докл. II Межд. конгр. по мерзлотоведению. Якутск, 1973. Вып. 3. С. 38–45.
 24. *Рогов В.В.* Особенности морфологии частиц скелета криогенного элювия // Криосфера земли. 2000. Т.IV. №3. С.67–73.
 25. *Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д.* Фракционно-групповой состав гумуса поверхностно-глеевых и гидроморфных почв Большеземельской тундры // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 3. 2012. Вып. 1. С. 107–120.
 26. *Городков Б.Н.* Об особенностях почвенного покрова Арктики // Изв. гос. геогр. о-ва. 1939. Т.71. Вып. 10. С. 1516–1532.

Статья поступила в редакцию 07.12.2012.

УДК 581.55:551.583.1:581.526.35

СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА CO₂-ГАЗООБМЕНА В СИСТЕМЕ «БОЛОТО-АТМОСФЕРА» В ПЕРИОД ОТСУТСТВИЯ АКТИВНОЙ ВЕГЕТАЦИИ РАСТЕНИЙ

О.А. МИХАЙЛОВ, С.В. ЗАГИРОВА, Н.Н. ГОНЧАРОВА, М.Н. МИГЛОВЕЦ

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
mikter@mail.ru

Статья посвящена изучению на мезо-олиготрофном болоте средней тайги суточной динамики вертикальных потоков CO₂ в приземном слое атмосферы. Впервые с использованием метода микровихревых пульсаций для территории европейского Северо-Востока России установлено, что в холодный период года суточный баланс вертикальных потоков CO₂ не превышает 1.1 г/м². Величины общего экосистемного обмена CO₂ и гросс-фотосинтеза зависят от интенсивности ФАР, а дыхание экосистемы – от температуры поверхности почвы. Весной более низкие значения показателей CO₂-газообмена в системе «болото–атмосфера» могут быть связаны с обводнением значительной части болота после таяния снега.

Ключевые слова: средняя тайга, верховое болото, вертикальные потоки CO₂, метод микровихревых пульсаций, суточная динамика

O.A. MIKHAILOV, S.V. ZAGIROVA, N.N. GONCHAROVA, M.N. MIGLOVETZ. THE DIURNAL DYNAMICS OF CO₂ GAS EXCHANGE IN THE "PEATLAND - ATMOSPHERE" SYSTEM DURING THE PERIOD OF ACTIVE PLANT VEGETATION ABSENCE

The paper studies the diurnal dynamics of CO₂ fluxes in the surface layer at the meso-oligotrophic peatland in middle taiga using the eddy covariance technique. It was found that in cold season the daily balance of CO₂ fluxes does not exceed 1.1 g/m². *NEE* and *P_{gross}* values depend on PAR and *R_{eco}* – on the temperature of soil surface. Lower values of CO₂ gas exchange in spring may be related to flooding much of the peatland after the snow melts.

Key words: middle taiga, bog, CO₂ fluxes, eddy covariance technique, diurnal dynamics

Торфяные болота играют ключевую роль в углеродном цикле планеты. За несколько тысячелетий в болотах высоких широт Северного полушария накоплено 400 – 500 Гт углерода, который в условиях потепления климата может стать источником активного поступления парниковых газов в атмосферу [1,2]. Согласно имеющимся данным, направление и величина вертикальных потоков CO₂ в системе «болото – атмосфера» зависят от температуры почвы [3], состояния растительного покрова [4], интенсивности ФАР [5]. Для Европейского Севера данные о величине стока и эмиссии углеродсодержащих парниковых газов в болотных экосистемах немногочисленны. Установлено, что тундровые сообщества с высоким уровнем грунтовых вод в летние месяцы активно поглощают диоксид углерода из атмосферы [6,7]. В болотных экосистемах бореальной зоны в летний период величина стока/эмиссии CO₂ зависит от характера микрорельефа и видового состава растений [8].

Наиболее интенсивно CO₂-газообмен на границе «болото – атмосфера» осуществляется в период активной вегетации растений, который в усло-

виях средней тайги на территории Республики Коми, по данным многолетних наблюдений, начинается 3 мая и продолжается в среднем 158 дней [9]. На территории Сыктывдинского района Республики Коми, где проводились исследования, окончание периода активной вегетации растений в 2010 г. отмечено 27–28 сентября, когда среднесуточная температура воздуха установилась ниже +5 °С, а его возобновление в 2011 г. – 1–2 мая. Согласно исследованиям, проведенным на севере Финляндии [10], в осенне-зимний период эмиссионный поток диоксида углерода с поверхности болота в атмосферу не прекращается и может достигать 10 – 40% эмиссии, наблюдаемой в конце июня – июля. Однако данные о величине потоков CO₂ в системе «болото–атмосфера» на европейском Северо-Востоке в период отсутствия активной вегетации растений не обнаружены. В связи с этим нами была поставлена цель – выявить закономерности суточной динамики вертикальных потоков диоксида углерода в приземном слое атмосферы на мезо-олиготрофном болоте средней тайги в осенне – весенний период.

Объект и методы исследования

Исследования проводили на мезо-олиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр, расположенном в Сыктывдинском районе Республики Коми, в 40 км на северо-запад от г. Сыктывкара (51° 56' с.ш. 56° 13' в.д.). Площадь его составляет 2790 га, средняя мощность торфа – 1,4 м, максимальная – 3,4 м. Болото располагается на второй надпойменной террасе, водоприемниками служат р. Пожег и р. Пычим. Торфяная залежь верхового, смешанного, переходного и низинного типа с зольностью 23 – 35% [11].

Геоботанические описания выполнены на четырех площадках 10x10 м, расположенных вдоль трансекты протяженностью 1 км, по общепринятой методике [12]. При классификации типов растительности на исследуемом участке болота использовали аэрофотоснимки. Растительность района исследования представлена следующими сообществами:

1) олиготрофные сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые сообщества, где на кочках доминируют сосна (*Pinus sylvestris* L.), андромеда (*Andromeda polifolia* L.), мирт болотный (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench), клюква (*Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.), морозка (*Rubus chamaemorus* L.), пушица (*Eriophorum vaginatum* L.), сфагновые мхи (*Sphagnum angustifolium* (C. Jens. ex Russ.), *Sphagnum fuscum* (Schimp.)), *Polytrichum strictum* Brid., а в мочажинах – андромеда, мирт болотный, клюква (*Oxycoccus palustris* Pers.), пушица, сфагновые мхи (*Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum magellanicum* Brid.);

2) мезотрофные кустарничково-травяно-сфагновые сообщества, с доминированием на кочках андромеды, мирта болотного, багульника (*Ledum palustre* L.), клюквы, пушицы, осоки (*Carex pauciflora* Lightf.), сфагновых мхов (*Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum fuscum*, *Sphagnum magellanicum*), в мочажинах – осок (*Carex lasiocarpa* Ehrh., *Carex limosa* L., *Carex rostrata* Stokes), вахты трехлистной (*Menyanthes trifoliata* L.), шейхцерии (*Scheuchzeria palustris* L.), мирта болотного, клюквы, пушицы, андромеды, мхов *Sphagnum fallax* (Klinggr.), *Sphagnum magellanicum*, *Warnstorfia exannulata* (B.S.G.);

3) мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь с кочковато-топяным микрорельефом, с преобладанием на кочках таких видов, как андромеда, мирт болотный, клюква (*Oxycoccus palustris*), хвощ (*Equisetum fluviatile* L.), осока (*Carex lasiocarpa*), мхи р. *Sphagnum* (*Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum fuscum*), а на топяном ковре – клюква (*Oxycoccus palustris*), осока (*Carex lasiocarpa*), пушица (*Eriophorum gracile* Koch), вахта трехлистная, мытник болотный (*Pedicularis palustris* L.), пузырчатка (*Utricularia intermedia* Hayne), сфагновые мхи (*Sphagnum fallax*, *Sphagnum magellanicum*), *Warnstorfia exannulata*, мхи р. *Calliergon*.

Для измерений вертикальных потоков CO₂-газообмена в системе «болото–атмосфера» использовали метод микровихревых пульсаций, детально описанный в работах [13, 14]. Измерительная система закрытого типа, которая включала ультразвуковой анемометр, определяющий направление и скорость ветра в трех проекциях и акустическую температуру воздуха (Solent R3, Gill Instruments Ltd., Великобритания), а также инфракрасный газоанализатор (Li-7000, Li-Cor Inc., США). Отбор проб воздуха проводили на высоте 4,23 м от поверхности болота (без учета снежного покрова) (рис. 1). Данные о скорости ветра и изменении концентрации диоксида углерода регистрировали с

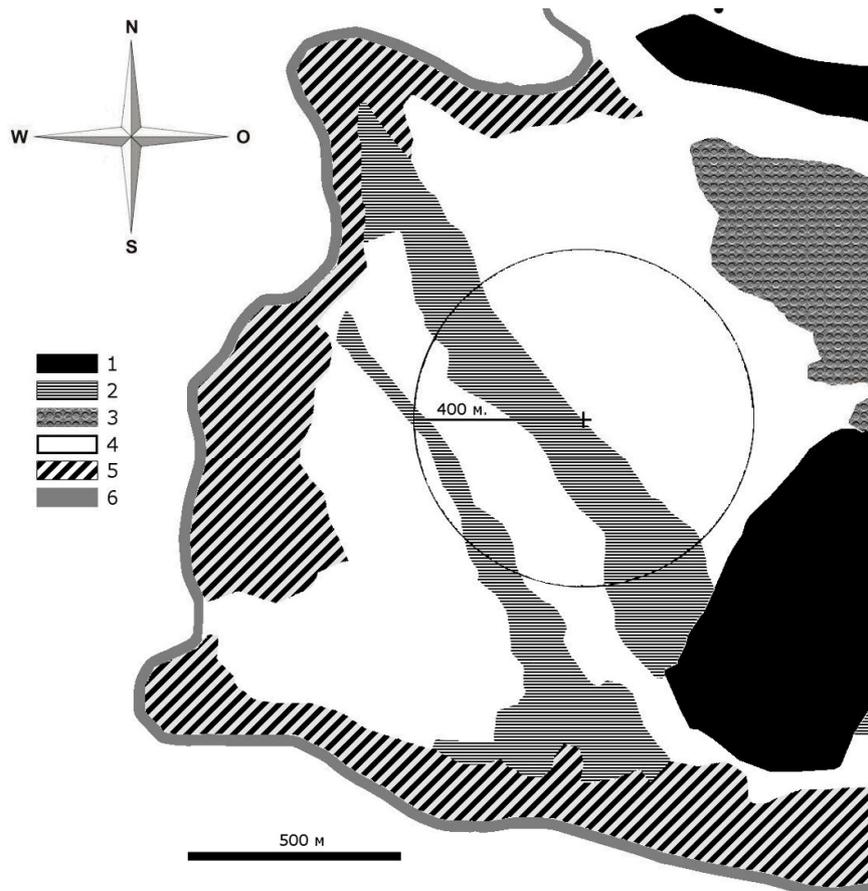


Рис. 1. Схема расположения измерительной системы на участке болота Медла-Пэв-Нюр. 1 – минеральный лесной остров; 2 – мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь; 3 – олиготрофные сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые сообщества; 4 – мезотрофные кустарничково-травяно-сфагновые сообщества; 5 – окраинная топь; 6 – граница болота.

частотой 20 Гц. Параметры микроклимата (температуру и влажность воздуха, интенсивность ФАР, падающей и отраженной солнечной радиации) регистрировали автоматической метеостанцией (Campbell Scientific, США). Среднюю величину чистого экосистемного обмена диоксида углерода (NEE), представляющего разницу между величинами валовой первичной продукции экосистемы (P_{gross}) и суммарного дыхания ее компонентов (R_{eco}), рассчитывали за 30-минутные интервалы с использованием программного обеспечения EdiRe (Robert Clement, Университет Эдинбурга, Великобритания). Контроль качества полученных данных включал: 1) контроль показателей сигнала датчиков, в том числе диапазон разброса и всплески; 2) статистические тесты, выявление резких изменений во временных рядах данных; 3) резкие изменения температуры воздуха, влажности, атмосферного давления за период усреднения данных (30 мин) [15].

Не отвечающие параметрам проверки значения потоков CO_2 не учитывали при дальнейшей обработке данных. Результирующий поток диоксида углерода (NEE) разделяли на дыхание экосистемы (R_{eco}) и гросс-фотосинтез (P_{gross}) по общепринятой методике [3, 16, 17]. Для расчета интенсивности дыхания экосистемы использовали уравнение:

$$R_{eco} = R_{10} * exp^{308.6 * \left(\left(\frac{1}{56.02} \right) - \left(\frac{1}{T_{surf} + 46.02} \right) \right)},$$

где R_{eco} – дыхание экосистемы ($мкг\ м^{-2}c^{-1}$), R_{10} – дыхание экосистемы при температуре воздуха $10\ ^\circ C$ ($мкг\ м^{-2}c^{-1}$), T_{surf} – температура поверхности почвы ($^\circ C$). Коэффициент R_{10} рассчитывали отдельно для каждого периода измерений.

Значение гросс-фотосинтеза вычисляли, используя выражение:

$$P_{gross} = NEE - R_{eco}.$$

Баланс вертикальных потоков диоксида углерода за сутки рассчитывали по формуле:

$$NEE_{diurnal} = 0.0036 * ((NEE_{av.daytime} * N_{daytime}) + (NEE_{av.nighttime} * N_{nighttime})),$$

где $NEE_{diurnal}$ – суточный экосистемный обмен вертикальных потоков диоксида углерода ($г/м^2\ сут^{-1}$), $NEE_{av.daytime}$ – средний экосистемный обмен вертикальных потоков диоксида углерода за период суток, при котором значения ФАР превышали $20\ мкмоль\ м^{-2}c^{-1}$ (день), $NEE_{av.nighttime}$ – средний экосистемный обмен вертикальных потоков диоксида углерода за период суток, при котором значения ФАР были меньше $20\ мкмоль\ м^{-2}c^{-1}$ (ночь), $N_{daytime}$ – продолжительность дня (час), $N_{nighttime}$ – продолжительность ночи (час).

Измерения CO_2 -газообмена на болоте проводили с 30 сентября 2010 г. по 28 апреля 2011 г. Для выявления межсезонных различий в скорости потоков CO_2 сравнивали данные нескольких суток в

осенний (3–4 октября 2010 г.), зимний (22–23 ноября 2010 г.) и весенний (18–19 апреля 2011 г.) периоды года. Краткая характеристика микроклиматических условий в эти дни приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики микроклиматических условий на болоте Медла-Пэв-Нюр в дни проведения наблюдений (средние значения)

Дни наблюдений	$T_{возд},\ ^\circ C$	$T_{пов},\ ^\circ C$	$ФАР^*,\ мкмоль\ м^{-2}c^{-1}$
3 – 4 октября	2.6	3.6	197.4
22 – 23 ноября	-9.6	-9.2	56.4
18 – 19 апреля	4.1	4.1	196.4

Примечание. *В расчетах учтены значения ФАР $\geq 20\ мкмоль\ м^{-2}c^{-1}$.

Результаты и обсуждение

В исследованиях зарубежных авторов было показано, что переход от стока к эмиссии в болотных экосистемах осенью связан с завершением вегетации растений. В Канаде этот процесс начинается с середины августа, в центре Европейской России и Центральной Сибири – с середины сентября [4, 5].

В среднетаежной подзоне на территории Республики Коми осенний период начинается в конце августа – начале сентября и продолжается до ноября, зима отмечается с ноября по март, а весна наступает в конце марта – начале апреля [9]. Согласно нашим наблюдениям, в октябре в течение суток, несмотря на невысокие значения потоков диоксида углерода, четко выделяются периоды дневного поглощения и ночной эмиссии CO_2 в атмосферу с поверхности болота (рис. 2). Сток углекислого газа из атмосферы в болотные сообщества происходил с 8 до 17 ч и составил в среднем $-16,2\ мкг/м^2c^{-1}$. В остальное время суток отмечена эмиссия CO_2 с поверхности болота со средней скоростью $30,6\ мкг/м^2c^{-1}$. В результате за сутки суммарная величина NEE составила $1,08\ г/м^2$. Полученные нами средние величины скорости нетто-обмена диоксида углерода между атмосферой и болотом в октябре сопоставимы с результатами измерений на олиготрофном болоте в Центральной Сибири [5]. Однако они в два раза ниже по сравнению с данными, приведенными для мезотрофного болота на севере Финляндии в осенний период [18]. На исследованном нами участке болота величина NEE за сутки близка к результатам, полученным на верховом болоте в Центральной Сибири [5], и соответствует данным, приведенным для олиготрофного болота Канады [19]. Скорость вертикальных потоков диоксида углерода (NEE) в течение дня в этот период года составила 4–10%, а ночью – 38–60% от значений, приводимых другими авторами для летних месяцев [10, 18, 19, 20].

С формированием снежного покрова в начале зимы эмиссионный поток CO_2 с поверхности болота не прекращался: его средняя скорость составила $12,7\ мкг/м^2c^{-1}$, а суммарное значение за сутки – $1,1\ г/м^2$.

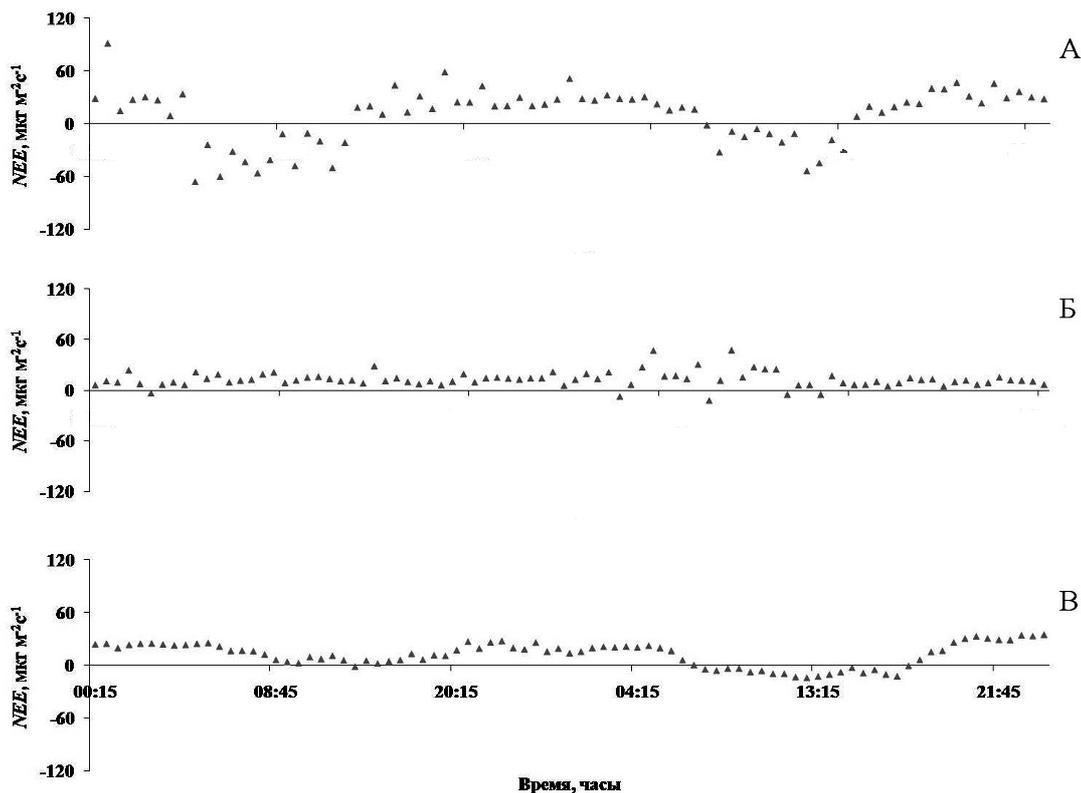


Рис. 2. Суточная динамика NEE с поверхности верхового болота осенью (А), зимой (Б) и весной (В). Примечание: Здесь и далее отрицательные значения соответствуют поглощению, а положительные – выделению CO_2 .

В этот период по причине отсутствия фотосинтеза растений величина NEE равнялась R_{eco} . Полученные нами значения CO_2 газообмена более чем в два раза выше результатов, полученных ранее для мезотрофных болот на северо-востоке Гренландии [20] и на севере Финляндии [10]. Однако они близки к данным, приведенным для олиготрофных болот на юге Швеции [21] и юго-востоке Канады [19].

Ранней весной, с началом таяния снега и оттаиванием верхних горизонтов почвы, когда активизируются процессы дыхания и фотосинтеза у растений, в дневное время суток на болоте нами отмечена слабая эмиссия ($8,6 \text{ мг/м}^2\text{с}^{-1}$) или слабый сток CO_2 ($-3,7 \text{ мг/м}^2\text{с}^{-1}$). В целом за сутки преобладало выделение CO_2 в атмосферу. Ночью, несмотря на низкую температуру воздуха и почвы, скорость эмиссии диоксида углерода с поверхности болота возрастала и составила в среднем $23,5 \text{ мг/м}^2\text{с}^{-1}$. В этот период величина NEE за сутки оставалась по-прежнему низкой (1 г/м^2). Сходные значения NEE для весенних месяцев приведены в литературе для верховых болот центральной части Европейской России и Центральной Сибири [5].

В экосистемах Субарктики резкое увеличение эмиссии CO_2 сразу после схода снега на болоте некоторые авторы связывают с усилением почвенного дыхания на фоне низкого фотосинтеза растений [18] и физической диффузией накопленного за зиму диоксида углерода в торфяной залежи [20]. Переключение эмиссии CO_2 на сток в болотной экосистеме происходит очень быстро в течение

нескольких дней с началом вегетации травянистых растений и кустарничков [5].

С помощью корреляционного анализа нами сделана попытка установить зависимость показателей CO_2 -газообмена в течение суток от основных микроклиматических факторов в дни проведения наблюдений на болоте (табл. 2).

Таблица 2

Корреляционные зависимости (r)* показателей CO_2 -газообмена от температуры поверхности почвы и интенсивности ФАР за сутки весной и осенью (значимы при $p \leq 0.05$)

Показатели CO_2 -газообмена	Осень		Весна	
	$T_{пов}$	ФАР	$T_{пов}$	ФАР
NEE (в дневное время)	$r=0.60$, $p=0.000$	$r=0.86$, $p=0.000$	$r=0.10$, $p=0.52$	$r=0.45$, $p=0.002$
R_{eco} (в ночное время)	$r=0.77$, $p=0.000$	-	$r=0.82$, $p=0.000$	-
P_{gross} (в дневное время)	$r=0.63$, $p=0.000$	$r=0.87$, $p=0.000$	$r=0.56$, $p=0.000$	$r=0.64$, $p=0.000$

Примечание. * r – коэффициент корреляции пирсона.

Величина NEE в болотной экосистеме в дневное время суток зависела от интенсивности ФАР. Однако весной она менее выражена. Осенью, когда некоторые кустарнички и мхи еще сохраняли способность фотосинтезировать, переход от выделения к поглощению CO_2 на болоте наблюдали при ФАР > 90 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$, а весной – при ФАР > 160 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (рис. 3). Эти различия могли быть связаны с разрушением части пигментов в листьях кустарничков.

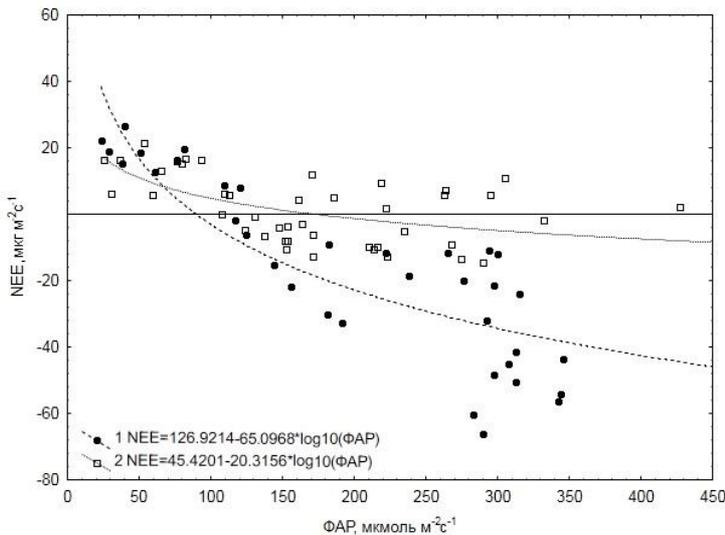


Рис. 3. Зависимость нетто-обмена CO_2 (NEE) от интенсивности ФАР: 3–4 октября 2010 г. (1); 18–19 апреля 2011 г. (2).

тарничков и мхов зимой, что ограничивало их фотосинтетическую способность в области низкой солнечной радиации в весенний период.

С функциональным состоянием пигментного комплекса в листьях могут быть связаны также различия в скорости фотосинтеза (P_{gross}) растений в разные периоды года (рис. 4). Установлено, что при сходных значениях ФАР фотосинтез в сообществах растений болота осенью идет интенсивнее в 3–3,5 раза, чем весной. В осенний период коэффициент корреляции P_{gross} с температурой поверхности почвы также был выше, чем весной (табл. 2). Согласно данным других авторов [22], у кустарничков ранней весной под действием повторяющихся заморозков нарушается транспирационный поток воды в растениях, что приводит к снижению фотосинтеза.

Снижение экосистемного дыхания в ночное время было сопряжено со снижением температуры поверхности почвы, а зависимость R_{eco} от температуры в течение суток описывалась экспоненциальной функцией (рис. 5). Увеличение $T_{пов}$ от 0 до +4 °C в октябре приводит к возрастанию R_{eco} более, чем в три раза, весной – всего лишь в два раза. Возможно, в апреле гетеротрофное дыхание ограничивается сильной обводненностью болота в результате таяния снега, что в свою очередь снижает дыхание всей экосистемы. В зимний период влияния микроклиматических факторов на вертикальные потоки CO_2 нами не выявлено.

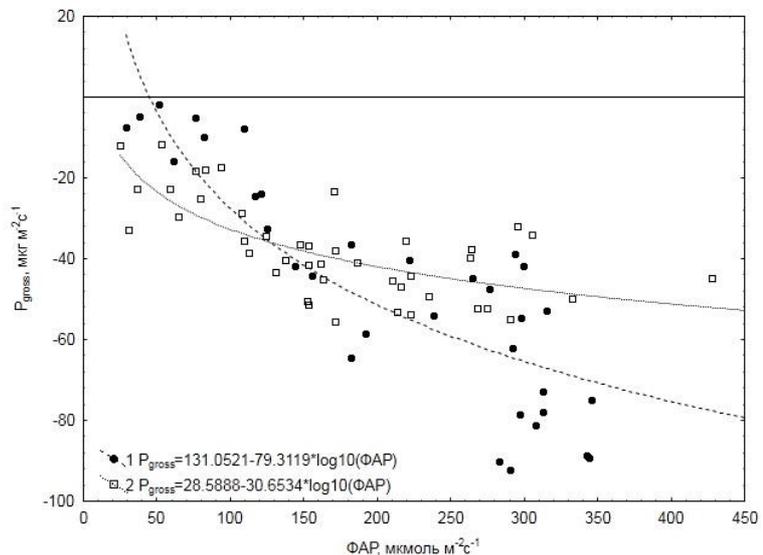


Рис. 4. Зависимость gross – фотосинтеза (P_{gross}) от интенсивности ФАР: 3–4 октября 2010 г. (1); 18–19 апреля 2011 г. (2).

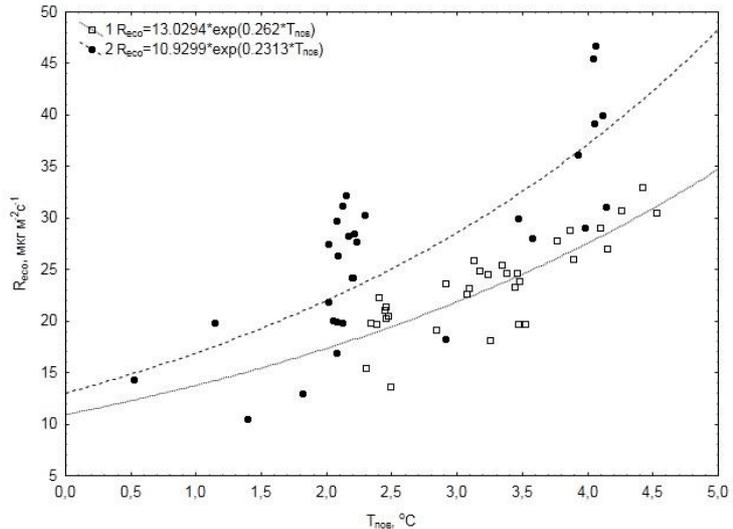


Рис. 5. Зависимость экосистемного дыхания (R_{eco}) от температуры поверхности почвы; 3–4 октября 2010 г. (1), 18–19 апреля 2011 г. (2).

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что в холодный период года с прекращением вегетации растений в болотной экосистеме среднетаежной подзоны эмиссия CO_2 превышает его сток. Величина нетто-обмена CO_2 (NEE) за сутки составляет 1,04–1,1 $\text{гм}^{-2}\text{сут}^{-1}$. NEE и P_{gross} в дневное время зависят, прежде всего, от интенсивности ФАР, а скорость экосистемного дыхания тесно связана с температурой поверхности почвы. Более низкие показатели CO_2 -газообмена в экосистеме весной, по сравнению с осенью, могут быть обусловлены состоянием фотосинтетического аппарата растений, а также высокой обводненностью болота после таяния снега.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ПРООН/ГЭФ 00059042 «Укрепление системы особо охраняемых природных территорий Республики Коми в целях сохранения биоразнообразия первичных лесов в районе верховьев реки Печора» в 2011 г. и научного проекта молодых ученых и аспирантов УрО РАН № 11-4-НП-408 «Эмиссия парниковых газов в экосистеме мезо-олиготрофного болота средней тайги».

Литература

- Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol. Applic.* 1991. Vol. 1. No 2. P. 182–195.
- Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // *Nature*. 2006. Vol. 440. P. 165–173.
- Lloyd J., Taylor J.F. On the temperature dependence of soil respiration // *Functional Ecology*. 1994. Vol. 8. №3. P. 315–323.
- Lafleur P.M., McCaughey J.H., Joiner D.W., Bartlett P.A. Seasonal trends in energy, water, and carbon dioxide fluxes at a northern boreal wetland // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. No. D24. P. 29009 – 29020.
- Arneeth A., Kurbatova J., Kolle O., et al. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // *Tellus*. 2002. No. 54B. P. 514–530.
- Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. Пороговая температура углеродного баланса южных тундр // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 358. №5. С. 708–709.
- Heikkinen J.E. P., Virtanen T., Huttunen J. T. et al. Carbon balance in East European tundra // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. Vol. 18. GB1023. DOI:10.1029/2003GB002054.
- Михайлов О.А., Загирова С.В., Мигловец М.Н. и др. Оценка потоков диоксида углерода в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота средней тайги // *Теоретическая и прикладная экология*. 2011. №2. С. 44–51.
- Леса Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова и А.И. Таскаева. М.: Дизайн. Информационная картография, 1999. 332 с.
- Laurila T., Soegaard H., Lloyd C. R. et al. Seasonal variations of net CO₂ exchange in European Arctic ecosystems // *Theor. and Appl. Climatology*. 2001. No. 70. P. 183–201.
- Торфяные ресурсы Республики Коми / Сост.: Б.Н.Ерцев, Н.В.Мальцева, О.А.Баулина и др. Сыктывкар: Полиграф-сервис, 2000. 613 с.
- Шенников А.П. Введение в геоботанику. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 447 с.
- Moncrieff J.B., Massheder J.M., de Bruin H. et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide // *J. Hydrology*. 1997. No. 188–189. P. 589–611.
- Baldocchi D.D. Hincks B.B., Meyers T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods // *Ecology*. 1988. Vol. 69. №5. P. 1331–1340.
- Foken Th., Gockede M., Mauder M. et al. Post-field data quality control // *Handbook of Micrometeorology*. Springer, Netherlands, 2005. P. 181–208.
- Reichstein M., Falge E., Baldocchi D. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm // *Global Change Biology*. 2005. No. 11. P. 1424–1439.
- Lasslop G., Reichstein M., Papale D., Richardson A. D. et al. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation // *Global Change Biology*. 2010. No. 16. P. 187–208.
- Aurela M., Laurila T., Tuovinen J.-P. Seasonal CO₂ balances of a subarctic mire // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. No. D2. P. 1623–1637.
- Lafleur P.M., Roulet N.T., Admiral S.W. Annual cycle of CO₂ exchange at a bog peatland // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 3071–3081.
- Nordstroem C., Soegaard H., Christensen T. R., Friberg T., Hansen B. U. Seasonal carbon dioxide balance and respiration of a high-arctic fen ecosystem in NE-Greenland // *Theor. and Appl. Climatology*. 2001. No. 70. P.149-166.
- Lund M., Lindroth A., Christensen T.R., Ström L. Annual CO₂ balance of a temperate bog // *Tellus*. 2007. No. 59B. P. 804–811.
- Maanavilja L., Riutta T., Aurela M. et al. Spatial variation in CO₂ exchange at a northern aapa mire // *Biogeochemistry*. 2011. No. 104. P. 325–345.

Статья поступила в редакцию 01.10.2012.

УДК 504.054:621.039:539.16.04

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Т.А. МАЙСТРЕНКО*, Е.С. БЕЛЫХ*, А.В. ТРАПЕЗНИКОВ**, В.Г. ЗАЙНУЛЛИН*, О.М. ВАХРУШЕВА*

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

**Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург
roginat@mail.ru, daryd22@gmail.com

Количественная оценка экологического риска радиоактивных воздействий необходима для контроля качества окружающей среды, сохранения биологических ресурсов и менеджмента радиоактивно загрязненных территорий. В работе приводятся рассчитанные по предложенной в рамках проекта ERICA методологии пределы дозовых нагрузок для разных групп организмов наземных экосистем. Также сделана оценка безопасных уровней радиационного воздействия для природных популяций растений и животных, обитающих на загрязненных в результате аварии на ЧАЭС территориях. Полученные результаты могут быть использованы для решения вопросов обеспечения радиационной безопасности и управления радиоактивно загрязненными территориями.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, дозы облучения биоты, авария на ЧАЭС, биологические эффекты

T.A. MAISTRENKO, E.S. BELYKH, A.V. TRAPEZNIKOV, V.G. ZAINULLIN, O.M. VAKHRUSHEVA. ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISK FROM RADIATION EXPOSURE FOR NATURAL ECOSYSTEMS CONTAMINATED DUE TO CHERNOBYL ACCIDENT

Quantitative estimation of ecological risk from radioactive exposure is required for environment quality control, biological resources conservation and management of radioactively contaminated territories. The paper presents dose limits calculated for different terrestrial biota species according to methodology proposed within the frames of ERICA project. Also assessment of radioactive exposure levels considered to be safe for natural plant and animal populations inhabiting areas contaminated as a result of Chernobyl NPP accident is made. Results obtained can be applied to management of radioactively contaminated territories and safety norms regulation.

Key words: radioactive contamination; irradiation doses for non-human biota; Chernobyl NPP accident; biological effects

Оценка экологического риска радиационного воздействия для природных экосистем относится к числу наиболее приоритетных задач в комплексе проблем, связанных с обеспечением устойчивого функционирования биосферы и развития человеческой цивилизации. Количественная оценка экологического риска радиоактивных воздействий необходима для контроля качества окружающей среды, сохранения биологических ресурсов и менеджмента радиоактивно загрязненных территорий.

Эволюция научных идей в области радиационной защиты человека привела к осознанию необходимости развития системы оценки экологического риска, связанного с радиоактивными воздействиями. Потребность в такой системе признана многими национальными агентствами по радиационной безопасности и международными организациями. В последнее десятилетие были приложены значительные усилия к обоснованию фундаментальных

принципов радиационной безопасности окружающей среды [1, 2].

Одновременно большое внимание уделялось развитию методологии оценки экологического риска радиационных воздействий [3–5]. С применением этой методологии были получены первые количественные оценки уровней радиационного воздействия, превышение которых может привести к негативным эффектам в экосистемах [6–10]. Однако недостаток достоверной информации о биологических эффектах в природных популяциях растений и животных, обитающих в условиях повышенного радиоактивного фона, и ограниченное число сопряженных данных о дозовых нагрузках и эффектах у биоты сдерживают развитие системы оценки экологического риска при радиоактивных воздействиях.

Решение этого вопроса особенно актуально при управлении территориями, загрязненными выбросами предприятий ядерного топливного цикла,

при радиационных авариях, а также в районах захоронения радиоактивных отходов.

Анализ данных радиационного мониторинга показывает, что при штатных условиях эксплуатации влияние объектов ядерно-энергетического комплекса на радиоактивность компонентов биосферы невелико по сравнению с воздействием естественного радиационного фона и не выходит за пределы приемлемого радиационного риска. Вместе с тем, в случае радиационной аварии возможно существенное загрязнение окружающей среды техногенными радионуклидами. При этом дозы облучения животных и растений оказываются более высокими, чем получаемые человеком. Потенциальная аварийность ядерных объектов весьма остро ставит вопрос о необходимости постоянного радиационного мониторинга биосферы, особенно в зонах влияния предприятий ядерно-энергетического комплекса. Оптимизация мониторинга и обоснование мер по обеспечению радиационно-экологической безопасности биосферы могут быть выполнены на основе методологии анализа экологического риска. Особенно нуждаются в таких разработках регионы России, Белоруси и Украины, почвы которых после чернобыльских выпадений до сих пор содержат повышенные концентрации таких техногенных долгоживущих радионуклидов, как ^{137}Cs , ^{90}Sr , Pu .

Целью настоящей работы являлась оценка экологического риска радиационного воздействия для природных наземных экосистем, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС. Для этого была создана база сопряженных данных по радиационной обстановке на исследуемых участках и наблюдаемых радиационно-индуцированных эффектах у растений и животных с этих территорий; проведена ретроспективная оценка поглощенных доз для различных видов биоты наземных экосистем; определены зависимости доза – эффект и пределы безопасных дозовых нагрузок для разных групп организмов.

Изучение радиоэкологической обстановки, сложившейся на радиоактивно загрязненных территориях, являлось основной целью многих исследований. Наблюдаемые у представителей различных видов растений и животных биологические эффекты отражены и обобщены в ряде научных публикаций и обзоров [7, 11, 12, 13] и базе данных FREDERICA [14].

Собранная нами база данных составлена на основе как доступных широкому кругу исследователей научных публикаций, так и изданных ограниченным тиражом препринтов серии «Научные доклады» и Трудов Коми научного центра УрО РАН. В этих работах показаны результаты планомерного мониторинга за состоянием природных экосистем на стационарных участках с различным уровнем радиационного загрязнения в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС.

В блок составляющих базу первичных данных вошли результаты более 100 опубликованных научных исследований о наблюдаемых эффектах у разных групп организмов из природных популяций с территорий, загрязненных в результате аварии на

ЧАЭС. Общий объем базы данных включает 1730 пар сопряженных значений доза облучения – биологический эффект. После тщательного анализа литературных источников из основного блока информации были исключены повторяющиеся, противоречивые показатели, а также результаты исследований, не имеющие соответствующих данных для контрольных участков.

Таким образом, в основной блок, используемый для последующей оценки поглощенных доз для растений и животных, определения зависимости доза – эффект и пределов дозовых нагрузок были включены данные 46 опубликованных работ. Часть из них представляет результаты комплексных исследований научных организаций.

При оценке радиационного воздействия на экосистемы и их компоненты необходимо применять комплексный подход, включающий определение содержания в объектах окружающей среды загрязняющих веществ и изучение биологических эффектов, наблюдаемых у растений и животных в ответ на это воздействие. Однако в первые годы после аварии в большинстве исследований, направленных на изучение биологического действия радиации на природные популяции растений и животных, не проводились определение содержания дозообразующих радионуклидов в среде обитания наземных организмов. Поэтому для таких случаев нами была произведена оценка поглощенных доз облучения для растений и животных на основе данных об уровне внешнего γ -фона, либо среднем содержании радионуклидов в почве исследуемого участка и коэффициентах накопления основных дозообразующих радионуклидов в компонентах биоты.

Полученные расчетным путем мощности поглощенных доз облучения и регистрируемые при этих значениях биологические эффекты составили основной блок данных, использованный для статистической обработки и построения дозовых моделей.

Для оценки зависимости доза – эффект и расчета значения дозы (EDR_{10}), при которой наблюдается изменение регистрируемого биологического эффекта на 10% по отношению к контролю, использовали программу R [15] и пакет приложений drc [16]. Основанием для выбора модели служило рассчитываемое программой значение критерия Акаике (AIC), учитывающего качество соответствия модели экспериментальным данным и степень сложности модели. Если несколько моделей имели достоверно не отличающиеся значения критерия, то выбирали модель с наименьшим числом свободных параметров. В том случае, если несколько моделей с одинаковым числом свободных параметров достоверно не отличались по качеству аппроксимации, выбирали ту, которая давала оценку EDR_{10} с наименьшей ошибкой.

Регрессионный анализ проводили для 15 видов животных и растений с использованием данных, включающих значения уровня биологического эффекта и дозовой нагрузки на контрольном и еще, как минимум, четырех экспериментальных участках. При моделировании зависимости биологический эффект – дозовая нагрузка использовали по-

казатели, характеризующие уровень генетической изменчивости организмов, морфологических изменений у растений, а также репродуктивной способности растений и животных. На основе выбранных моделей были определены значения мощностей поглощенных доз EDR₁₀ и EDR₅₀, вызывающих изменение наблюдаемых эффектов на 10 и 50 %, соответственно, у представителей двух видов дре-

весных и шести видов травянистых растений, двух групп беспозвоночных и четырех видов млекопитающих. Полученные результаты представлены в табл. 1. В том случае, когда дозы облучения одного и того же вида оценивали по нескольким биологическим показателям, в дальнейший анализ включали тот, для которого коэффициент вариации значений EDR₁₀ и EDR₅₀ был наименьшим.

Таблица 1

Рассчитанные значения дозовых нагрузок EDR₁₀ и EDR₅₀, вызывающих изменение биологических показателей на 10 и 50 %, соответственно, для разных групп организмов наземных экосистем, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС

Организм	Биологический показатель	Мощность поглощенной дозы, мкГр/ч		Ссылка на источник первичных данных
		EDR ₁₀	EDR ₅₀	
<i>Древесные растения</i>				
<i>Pinus sylvestris</i> L.	Хромосомные aberrации в клетках корневой меристемы проростков семян	94±24	145±24	[17]
	Число семян в шишке	162±45	1100±2900	[18]
	Жизнеспособность пыльцы	206±96	1360±630	[19]
	Длина пыльцевых трубок	840±770	5500±5100	[19]
	Доля пустых семян	140±120	910±770	[19]
	Всхожесть семян	230±149	570±140	[19]
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	Масса вегетативных побегов	210±160	290±57	[19]
	Количество хвоинок на вегетативном побеге	153±123	1000±810	[19]
	Средняя длина хвоинок	324±48	360±220	[19]
	Масса 100 хвоинок	370±1300	2400±8600	[19]
<i>Травянистые растения</i>				
<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.	Частота эмбриональных летальных мутаций	380±270	2500±1800	[20]
<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.	Эффективность репарации ДНК	1242±0,4	9500±2900	[21]
	Количество односторонних разрывов ДНК	450±220	3100±1400	[21]
<i>Plantago lanceolata</i> L.	Всхожесть семян	34±22	178±378	[22]
<i>Phleum pratense</i> L.	Масса растения	140±250	350±1630	[23]
	Всхожесть семян	49±88	320±580	[23]
<i>Taraxacum officinalis</i> Webb.	Всхожесть семян	114±45	750±300	[23]
	Частота хромосомных aberrаций в клетках корневой меристемы проростков семян	0,7±0,6	4,6±3,9	[23]
<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	Всхожесть семян	22±12	141±79	[23]
<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	Всхожесть семян	101±59	662±385	[23]
<i>Dactylis glomerata</i> L.	Всхожесть семян	24±26	162±170	[23]
<i>Беспозвоночные животные</i>				
<i>Myriapoda</i> Latreille	Численность популяции	6,3±2,5	41±16	[24]
<i>Araneae</i> Clerck	Численность популяции	11±4	74±27	[24]
<i>Млекопитающие (мышевидные грызуны)</i>				
<i>Microtus oeconomus</i> Pallas	Частота хромосомных aberrаций в клетках гепатоцитов неполовозрелых животных	50±390	340±2940	[25]
	Частота митозов в клетках гепатоцитов неполовозрелых животных	3,7±0,9	7,3±1,5	[25]
	Хромосомные aberrации в клетках гепатоцитов половозрелых животных	240±270	1600±1800	[25]
	Частота митозов в клетках гепатоцитов половозрелых животных	740±80	4880±300	[25]
<i>Microtus oeconomus</i> Pallas	Доля нейтрофилов в составе периферической крови	1,5±0,2	10,0±1,1	[26]
	Доля лимфоцитов в составе периферической крови	55±150	360±980	[26]
	Доля моноцитов в составе периферической крови	0,03±0,01	0,32±0,14	[26]
	Частота микроядер в клетках костного мозга	12±7	82±49	[26]
<i>Clethrionomys glareolus</i> Schreber	Частота aberrаций хромосом в клетках эпителия кишечника	15,9±0,2	79,4±1,2	[27]
	Частота aberrаций хромосом в клетках костного мозга	0,25±0,25	1,62±1,62	[28]
<i>Mus musculus</i> L.	Постимплантационная эмбриональная смертность	1,2±3,6	8,0±24,0	[29]
	Преимплантационная эмбриональная смертность	400±52000	3000±34000	[29]
	Частота аномальных головок спермиев	4,2±0,7	13±32	[29]
<i>Apodemus agrarius</i> Pallas	Частота микроядер в клетках костного мозга неполовозрелых животных	121±78	124±125	[30]
	Частота микроядер в клетках костного мозга половозрелых животных	21±14	136±93	[30]
	Частота микроядер в клетках костного мозга	210±230	1360±1600	[31]
	Частота аномальных головок спермиев	440±470	2900±31	[31]

Примененная нами методология позволяет определить и использовать для оценки экологических рисков безопасные пределы дозовой нагрузки не для конкретного вида, а сообщества организмов, принимая в качестве такого множества 95 % всех рассмотренных растений и животных.

Рассчитанные по первичным данным и представленные в табл. 1 значения EDR для ряда видов и показателей биологических эффектов (масса 100 хвоинок *Picea abies*, масса растений и всхожесть семян *Phleum pratense*, всхожесть семян *Dactylis glomerata*, частота хромосомных aberrаций в клетках гепатоцитов и доля лимфоцитов в составе периферической крови *Microtus oeconomus*, преимплантационная эмбриональная смертность и частота aberrаций хромосом в клетках костного мозга *Clethrionomys glareolus*, частота микроядер в клетках костного мозга и частота аномальных головок спермиев *Apodemus agrarius*, *Mus musculus*) определены на основе аппроксимирующих зависимостей, характеризующихся очень слабой корреляционной связью переменных. Полученные при расчетах для некоторых видов растений и животных высокие пределы дозовых нагрузок, вероятно, могут быть обусловлены недостаточным объемом выборки экспериментальных данных, что, в свою очередь, приводит к отсутствию достоверной зависимости между регистрируемым биологическим эффектом и уровнем радиационного воздействия. Для построения и анализа статистической кривой распределения видов по радиочувствительности использовали EDR₁₀ только для тех показателей, которые имели достоверную корреляционную зависимость признака от дозы облучения и наименьший для данного организма коэффициент вариации значений биологического эффекта.

Высокая вариабельность значений EDR₁₀ и EDR₅₀ связана с небольшим числом пар данных (n=5–15), отсутствием в первоисточниках информации о биологическом состоянии объекта (физиологический статус, индивидуальные особенности организма), пространственной мобильностью животных на загрязненных и контрольных участках, методическими различиями в оценке исследователями радиационной ситуации, большим числом точек в области высоких дозовых нагрузок при построении регрессионной зависимости и единичным значением показателя для биоты из контрольных популяций, а также другими важными факторами. Так, оценки пределов EDR₁₀ безопасных доз облучения для групп наземных организмов, выполненные J. Garnier-Laplace с соавторами [32] с использованием вероятностной SSD методологии, имеют коэффициенты вариации от 1 до 72000 %. Поэтому для разработки более точных критериев экологического нормирования доз облучения растений и животных в природных популяциях необходимо расширять базу данных о наблюдаемых в природных популяциях биологических эффектах, унифицировать методические подходы при определении параметров радиационной обстановки и выборе наиболее чувствительных к ионизирующему излучению показателей биологических эффектов.

Особенно чувствительными к повреждающему действию радиации оказались мышевидные грызуны и почвенные беспозвоночные (табл. 1). Значения мощности дозы, приводящей к увеличению на 10 % частоты аномальных головок спермиев в популяции *Mus musculus*, частоты aberrаций хромосом в клетках костного мозга *Clethrionomys glareolus* и снижению количества нейтрофилов в формуле крови *Microtus oeconomus*, определены как 4,2±0,7, 15,9±0,2 и 1,5±0,2 мкГр/ч, соответственно. Снижение численности популяций пауков и многоножек на 10 % по сравнению с контрольной незагрязненной радионуклидами территорией наблюдали при мощностях дозы 11,3±4,0 и 46,5±6,3 мкГр/ч, соответственно. В то же время уровень радиационного воздействия, приводящего к увеличению на 10 % частоты нормальных митозов в клетках печени *Microtus oeconomus*, оказался более высоким – 742±77 мкГр/ч.

Как и следовало ожидать, растения оказались устойчивее к действию ионизирующего излучения. Возрастание на 10 и 50 % частоты aberrаций хромосом в проростках семян *Pinus sylvestris* следует ожидать при мощностях поглощенных доз 94±24 и 148±24 мкГр/ч, соответственно. Для другого представителя класса хвойных – *Picea abies* – в анализ были включены только изменения морфологических показателей для деревьев с участков с разным уровнем радиоактивного загрязнения, поскольку другие соответствующие нашим требованиям данные в первоисточниках отсутствовали. Для оценки безопасных пределов облучения была выбрана средняя длина хвоинок, поскольку этот биологический эффект характеризуется наименьшим коэффициентом вариации. Расчетное значение EDR₁₀ в этом случае оказалось значительно выше, чем для сосны, и составило 324±48, EDR₅₀ – 360±220 мкГр/ч.

Репродуктивную способность травянистых растений часто оценивают по снижению всхожести семян. На территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС, изменение этого биологического показателя на 10 % по отношению к контролю можно было ожидать при дозовых нагрузках в интервале от 20 до 120 мкГр/ч для разных видов растений. Наиболее чувствительными среди проанализированных видов оказались популяции *Echinochloa crusgalli*, *Dactylis glomerata* и *Plantago lanceolata*. Рассчитанные значения EDR₁₀ для этих видов растений составили 22±12, 24±26 и 34±22 мкГр/ч, соответственно.

Снижение эффективности репарационных процессов на 10 % в клетках *Arabidopsis thaliana* отмечали только при дозе облучения 1242 мкГр/ч, что в три раза превосходит предельное значение доз облучения (400 мкГр/ч), выше которых уже могут наблюдаться достоверные биологические эффекты [33, 34]. Число одноклеточных разрывов ДНК, по которому авторы [21] оценивали эффективность репарации ДНК арабидопсиса, не используют в качестве специфического маркера радиационного воздействия, поскольку повышение частоты повреждений ДНК при увеличении дозы облучения при-

водит к гибели сильно поврежденных клеток. Элиминация их из исследуемой выборки ведет к завышению значений эффективности репарационных процессов при высоких дозовых нагрузках, обусловленная, тем самым, более высоким пределом безопасных доз облучения. Поэтому в последующий анализ включили другой биологический показатель для растений *Arabidopsis thaliana* – частоту эмбриональных летальных мутаций [20]. Рассчитанное в этом случае значение EDR₁₀ составило 380±270 мкГр/ч.

На основе данных, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод о том, что генетические изменения, такие как частота aberrаций хромосом и репродуктивная способность в целом оказываются более чувствительными к действию радиации. Ве-

облучения для наземных растений и животных, превышение которого может привести к негативным последствиям для биоты, составило 10 мкГр/ч.

Нами применен этот подход при анализе биологических эффектов у растений и животных из природных популяций, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС. Рассчитанные для 15 видов наземных растений и животных значения EDR₁₀, определяющие чувствительность организма к радиационному воздействию, были расположены в порядке возрастания мощности дозы облучения. Для каждого порогового значения EDR₁₀ рассчитали долю видов, у которых наблюдали достоверные негативные биологические эффекты при превышении этой дозы (см. рисунок).

Таблица 2

Значения EDR₁₀ и доля видов, для которых наблюдали достоверные изменения биологического эффекта при превышении соответствующего значения EDR₁₀ от числа включенных в анализ

Вид / группа организмов	EDR ₁₀ , мкГр/ч	Доля видов, %
<i>Древесные растения</i>		
<i>Pinus sylvestris</i> L.	94±24	53,3
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	213±160	86,7
<i>Травянистые растения</i>		
<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.	380±270	93,3
<i>Plantago lanceolata</i> L.	32±22	40,0
<i>Phleum pratense</i> L.	144±88	80,0
<i>Taraxacum officinalis</i> Webb	114±45	66,7
<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	22±12	26,7
<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	101±58	60,0
<i>Dactylis glomerata</i> L.	25±26	33,3
<i>Беспозвоночные</i>		
<i>Myriapoda</i> Latreille	47±6	46,7
<i>Araneae</i> Clerck	11±4	13,3
<i>Мышевидные грызуны</i>		
<i>Microtus oeconomus</i> Pallas	742±77	100
<i>Clethrionomys glareolus</i> Schreber	15,9±0,2	20,0
<i>Mus musculus</i> L.	4,2±0,7	6,7
<i>Apodemus agrarius</i> Pallas	121±87	73,3

Примечание: для EDR₁₀ приведены среднее значение и стандартное отклонение.

личина коэффициента вариации, а также расчетные значения оценок пределов облучения, основанные на исследованных морфологических показателях, оказались в среднем выше.

Предложенная в рамках проекта ERICA [6] система оценки безопасных пределов доз при действии ионизирующего излучения основана на распределении видов по чувствительности. В качестве скринингового безопасного уровня радиационного воздействия при таком подходе принимают мощность поглощенной дозы, при которой у 5% видов могут наблюдаться изменения биологических эффектов на 10% по отношению к контрольному значению. Рассчитанное по этой методологии значение мощности дозы

Мощность дозы, при которой у 5 % включенных в анализ видов могут наблюдаться изменения биологических показателей на 10 % по отношению к контролю, находится в диапазоне значений 1,7–3,1 мкГр/ч. Полученные нами данные хорошо согласуются с результатами других исследователей, которые определили, что предел безопасного радиационного воздействия для популяций животных и растений с территорий, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, составляет 1,7 мкГр/ч [32]. В случае хронического облучения живых организмов из наземных, водных и прибрежных экосистем появление негативных биологических эффектов следует ожидать при дозовой нагрузке более 10 мкГр/ч [20].

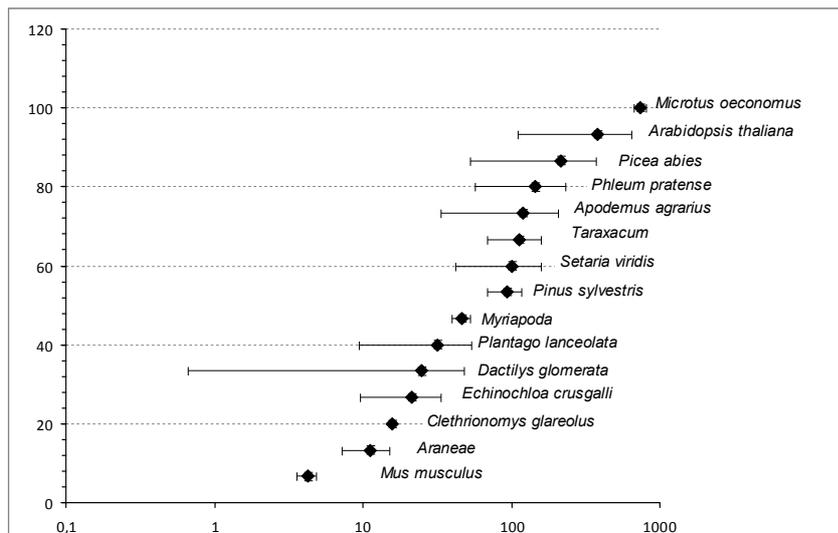


Рис. Распределение видов растений и животных из хронически облучаемых природных популяций по чувствительности к радиационному воздействию. По оси абсцисс – мощность взвешенной поглощенной дозы, мкГр/ч; по оси ординат – доля видов, %.

Заключение

Использование современной методологии оценки экологического риска позволило рассчитать предельное значение дозовой нагрузки, превышение которой приводило к появлению негативных эффектов в популяциях наземных животных и растений с территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС.

Полученные нами результаты позволяют восполнить пробел в научных знаниях, касающихся оценки безопасных уровней воздействия и устойчивости природных популяций растений и животных к хроническому радиационному воздействию, и могут быть использованы соответствующими федеральными организациями, занимающимися вопросами регулирования радиационной безопасности и управления радиоактивно загрязненными территориями.

Работа частично профинансирована в рамках проектов ОФИ–Урал 2011-2012 и №12-И-4-2006.

Литература

1. *International Atomic Energy Agency (IAEA). Fundamental safety principles: safety fundamentals. IAEA safety standards series No. SF-1, ISSN 1020-525X, ISBN 92-0-110706-4. Vienna: IAEA, 2006.*
2. *International Commission on Radiological Protection (ICRP). The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103. Ann. ICRP, 2007. Vol. 37. No. 2-4. 321 p.*
3. *Beresford N.A., Barnett C.L., Jones D.G. et al. Background exposure rates of terrestrial wildlife in England and Wales // J. Environ. Radioactivity. 2008. Vol. 99. P. 1430-1439.*
4. *Hingston J.L., Copplestone D., Beresford N.A., Howard B.J. Deliverable 3: A Review of Ap-*

proaches to Protection of the Environment from Chemicals and Ionising Radiation: Requirements and Recommendations for a Common Framework. Report for the PROTECT Project. EC Contract № 036425 (FI6R). Centre for Ecology & Hydrology-Lancaster. Lancaster, 2007.

5. *Vives i Batlle J., Balonov M., Beaugelin-Seiller K. et al. Inter-comparison of unweighted absorbed dose rates for non-human biota. // Radiat. Environ. Biophysics. 2007. Vol. 46. P. 349-373.*
6. *Garnier-Laplace J., Della-Vedova C., Andersson P. et al. A multi-criteria weight of evidence approach for deriving ecological benchmarks for radioactive substances // J. Radiol. Protection. 2010. Vol. 30. P. 215-233.*
7. *Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A. et al. Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. // J. Environ. Radioactivity. 2005. Vol. 80. P. 1-25.*
8. *Evseeva T., Majstrenko T., Geras'kin S. et al. Estimation of ionizing radiation impact on natural *Vicia cracca* populations inhabiting areas contaminated with uranium mill tailings and radium production wastes. // Sci. Total Environ. 2009. Vol. 407. P. 5335-5343.*
9. *Evseeva T.I., Майстренко Т.А., Гераськин С.А., Белых Е.С. Оценка дозовых нагрузок, не вызывающих негативных эффектов в природных популяциях растений при хроническом воздействии радионуклидов уранового и ториевого рядов // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50. № 4. С. 383-390.*
10. *Evseeva T.I., Гераськин С.А., Белых Е.С. и др. Оценка риска радиационного воздействия для референтных видов растений (сосны обыкновенной и горошка мышиного) с территории складирования отходов радиевого производства // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 2. С. 187-197.*
11. *Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Alexakhin R.M. Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. // Environment International. 2008. Vol. 34. P. 880-897.*
12. *Sazykina T., Kryshev I.I. Radiation effects in wild terrestrial vertebrates – the EPIC collection. // J. Environ. Radioactivity. 2006. Vol. 88. P. 11-48.*
13. *Smith J.T., Beresford N.A. Chernobyl. Catastrophe and Consequences. Berlin – New York: Springer; Chichester: Praxis Pub., 2005. 310 p.*
14. *FREDERICA Radiation Effects Database (www.frederica-online.org).*

15. *R Development Core Team*. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R: Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2004. (www.R-project.org).
16. Ritz C., Streibig J.C. Bioassay Analysis using R. // J. Statist. Software. 2005. Vol. 12. No 5.
17. Кальченко В.А., Федотов И.С. Генетические эффекты острого и хронического воздействия ионизирующих излучений на *Pinus sylvestris* L., произрастающих в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС // Генетика. 2001. Т. 37. № 4. С. 437–447.
18. Кальченко В.А., Федотов И.С., Игонина Е.В. и др. Радиационно-генетический мониторинг популяций *Pinus sylvestris* L. зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Радиобиология. 2000. Т. 40. №5. С.607–614.
19. Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2002. 272 с.
20. Абрамов В.И., Динева С.В., Рубанович А.В., Шевченко В.А. Генетические последствия радиоактивного загрязнения популяций *Arabidopsis thaliana*, произрастающих в 30-километровой зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35. № 5. С. 676–689.
21. Абрамов В.И., Сергеева С.А., Птицына С.Н. и др. Генетические эффекты и репарация однонитевых разрывов ДНК в популяциях *Arabidopsis thaliana*, произрастающего в окрестностях Чернобыльской АЭС // Генетика. 1992. Т. 28. № 6. С. 669–673.
22. Фролова Н.П., Попова О.Н., Таскаев А.И., Фролов Ю.М. Мониторинг природной популяции *Plantago lanceolata* L. в 30-километровой зоне ЧАЭС. Сыктывкар, 1989. 49 с. (Серия препр. "Научные доклады"/АН СССР. Уральское отделение, Коми НЦ).
23. Попова О.Н., Фролова Н.П., Улле З.Г., Трофимова Н.А. Оценка по потомству качества семян, формирующихся в хронически облучающихся фитоценозах // Экологические последствия радиоактивных загрязнений среды. Сыктывкар, 1991. С. 95–107. (Тр. Коми НЦ УрО АН СССР; №120).
24. Krivolutzkii D.A., Pokarzhevskii A.D. Effects of radioactive fallout on soil animal populations in the 30 km zone of the Chernobyl atomic power station. // Sci. Total Environ. 1992. Vol. 112. P. 69–77.
25. Материй Л.Д., Гончаров М.И. Мобилизация компенсаторно-восстановительных процессов в поврежденной печени полевок-экономок из 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС// Воздействие радиоактивного загрязнения на наземные экосистемы в зоне аварии на Чернобыльской АЭС (1986–1996). Сыктывкар, 1996. Т. 1. С. 41–57. (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 145).
26. Материй Л.Д. Динамика морфологических проявлений процессов поражения и восстановления в кроветворной системе полевок-экономок из 30-километровой зоны аварии на Чернобыльской АЭС // Воздействие радиоактивного загрязнения на наземные экосистемы в зоне аварии на Чернобыльской АЭС (1986–1996). Сыктывкар, 1996. Т.1. С.12–40. (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 145).
27. Елисева К.Г., Картель Н.А., Войтович А.М. и др. Хромосомные aberrации в различных тканях мышевидных грызунов и амфибий из загрязненных радионуклидами районов Беларуси // Цитология и генетика. 1996. Т. 30. № 6. С. 20–25.
28. Гончарова Р.И., Рябоконт Н.И., Слуквин А.М. Динамика мутабельности соматических и половых клеток животных, населяющих районы выпадения радиоактивных осадков// Цитология и генетика. 1996. Т. 30. № 4. С. 35–41.
29. Shevchenko V.A., Pomerantseva M.D., Ramaiya L.K. et al. Genetic disorders in mice exposed to radiation in the vicinity of the Chernobyl nuclear power station // Sci. Total Environ. 1992. Vol. 112. P. 45–56.
30. Башлыкова Л.А. Частота микроядер в клетках костного мозга мышевидных грызунов в условиях радиоактивного загрязнения // Экологические последствия радиоактивных загрязнений среды. Сыктывкар, 1991. С. 58–64. (Тр. Коми НЦ УрО АН СССР; № 120).
31. Зайнуллин В.Г., Таскаев А.И., Башлыкова Л.А. и др. Эколого-генетический мониторинг популяций мышевидных грызунов, подвергшихся хроническому облучению//Радиоэкологические исследования в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Сыктывкар, 2006. С. 34–47. (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 180).
32. Garnier-Laplace J., Geras'kin S., Della-Vedova C. и др. Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates. // J. Environ Radioact. 2013. Vol. 121. P. 12–21.
33. International atomic energy agency (IAEA). Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards, Technical Reports Series No. 332. Vienna: IAEA, 1992.
34. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annex. New York: United Nations, 1996.

Статья поступила в редакцию 23.05.2012.

УДК 631.461:574.2 (470.13)

МИКРОБИОТА РИЗОСФЕРЫ РАСТЕНИЙ И ЕЕ РОЛЬ В ИЗМЕНЕНИИ СУБСТРАТА НА ПОСТТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ КРАЙНЕСЕВЕРНОЙ ПОДЗОНЫ ТАЙГИ (РЕСПУБЛИКА КОМИ)

В.А. КОВАЛЕВА, И.А. ЛИХАНОВА, И.Б. АРЧЕГОВА

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
kovaleva.vera2011@ya.ru, likhanova@ib.komisc.ru, archegova@ib.komisc.ru*

Изучен микробный комплекс ризосферы растений в почвах восстанавливаемых посттехногенных экосистем Республики Коми на интенсивном этапе системы природовосстановления. Приведены результаты агрохимического и микробиологического анализов субстрата ризосферы растений и вне ее, на основании которых сделано заключение о формировании биогенно-аккумулятивного слоя при взаимодействии растений и микроорганизмов в ризосфере – как очаге первичного почвообразования.

Ключевые слова: ризосфера, восстанавливаемая почва, очаговость почвообразования

V.A. KOVALEVA, I.A. LIKHANOVA, I.B. ARCHEGOVA. MICROBIOTA OF RHIZOSPHERE AND ITS ROLE IN THE CHANGE OF SUBSTRATE ON POST-TECHNOGENIC TERRITORIES IN EXTREME-NORTH SUBZONE OF TAIGA (THE KOMI REPUBLIC)

The paper deals with the research of the rhizosphere microbial complex of plants in soils of the recovered post-technogenic ecosystems of the Komi Republic at “intensive” stage of nature restoration system. Results of agrochemical and microbiological analysis of the substrate of plants rhizosphere and outside it are given, on which basis the conclusion on the formation of biogenic-accumulative layer at interaction of plants and microorganisms in rhizosphere as the focus of primary soil formation is made.

Key words: rhizosphere, restored soil, focus of soil formation

Суровые климатические условия Севера при наличии многолетней мерзлоты обуславливают определенные особенности в строении почв природных экосистем. Это проявляется в резком разделении профиля почвы на маломощный продуктивный органогенный слой и бедную элементами питания минеральную толщу. Такое строение почвы является, с одной стороны, приспособлением биотической компоненты природных экосистем к суровым условиям Севера, с другой – усиливает их уязвимость к техногенным (антропогенным) воздействиям. При техногенном воздействии разрушается плодородный слой и обнажается минеральный, малопродуктивный для самовосстановления растительного сообщества (экосистемы в целом), увеличивая начальный период самовосстановительной сукцессии и активизируя развитие эрозионного процесса.

С учетом отмеченного была разработана система приемов природовосстановления, ускоряющая начальный период самовосстановительной сукцессии [1]. Система включает два этапа: на первом, интенсивном этапе с помощью комплекса агротехнических приемов (внесение удобрений и посев адаптированных к условиям Севера многолетних трав) в короткие сроки (три–пять лет) вос-

станавливается уничтоженный биогенно-аккумулятивный слой, который и обеспечивает активизацию самовосстановления древесного яруса и в целом экосистемы зонального типа на втором, ассимиляционном этапе. В биогенно-аккумулятивном слое сосредоточена подавляющая масса корней и почвенных микроорганизмов, функционирующих в ризосфере растений. Для выявления механизма формирования органогенно-аккумулятивного слоя в посттехногенном субстрате необходимо изучение взаимодействия растений и сообщества почвенных микроорганизмов в ризосфере.

Ризосфера растений как динамическая среда, где взаимодействуют микроорганизмы, корни растений и абиотические компоненты субстрата, изучалась рядом исследователей [2–6]. Взаимодействие растений и микроорганизмов в ризосфере является важным аспектом в проблеме восстановления экосистем на Севере, который в настоящее время практически не изучен.

Исследования проведены в Усинском р-не Республики Коми (крайнесеверная подзона тайги) – районе интенсивной добычи нефти, где остро стоит проблема восстановления природных экосистем на посттехногенных территориях. Цель исследования –

определить качественно-количественные характеристики комплекса микроорганизмов ризосферы растений в процессе восстановления почвы на первом интенсивном этапе системы природовосстановления.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на территории песчаного карьера, где весной 2006 г. был заложен опыт, схема которого приведена в табл. 1. Повторность опыта трехкратная. Субстрат карьера, на котором был заложен опыт, – песчаный, перевиваемый, бедный питательными веществами: содержание органического углерода ($C_{орг.}$) – 0.1–0.2 %, гидролизующего азота ($N_{гидр.}$) – 0.1–0.3 мг/100 г в.с.п. Несмотря на прошедшие 28 лет после окончания разработки карьера, самовосстановления растительного покрова к началу опыта не происходило.

Таблица 1

Схема опыта на первом этапе системы природовосстановления

Вариант опыта	Посадочный материал	Интенсивный этап		
		Агротехнические приемы улучшения субстрата при закладке опыта	Система ухода	
			Весенние подкормки	Осенние подкормки
1	Двулетние сеянцы сосны (5000 шт./га)	–	–	–
2	Двулетние сеянцы сосны (5000 шт./га)	БИАК** – 5т/га, N45P45K45, травосмесь* (20 кг/га)	ежегодные в течение 4 лет (N45P45K45), начиная со второго года опыта	на второй (N45) и третий (N45P45K45) годы
3	Двулетние сеянцы сосны (5000 шт./га)	N45P45K45, травосмесь* (20 кг/га)	ежегодные в течение 4 лет (N45P45K45), начиная со второго года опыта	на второй (N45) и третий (N45P45K45) годы

Примечание: * – состав травосмеси: мятлик луговой, овсяница красная, овсяница луговая, кострец безостый, тимopheвка луговая (соотношение 1:1:1:1);

** – БИАК – органическое удобрение, продукт биотехнологической переработки гидролизного лигнина.

Агрохимический анализ субстрата проводили общепринятыми в почвоведении методами [6,7]. Для изучения микробного комплекса ризосферы растений отобраны в вариантах 1 и 2 монолиты площадью 15х15 см на глубину 25 см с растениями сосны. В варианте 2 корни сосны плотно переплелись с корнями травянистых растений, поэтому были отобраны вместе в одном монолите.

Обычно выделяют микроорганизмы, поселяющиеся на поверхности корня – микрофлора ризопланы и группа обитающих в слое почв, приле-

гающем к корням – микрофлора ризосферы [8,9]. Разделение это достаточно условно и носит субъективный характер, так как практически нельзя точно разграничить ризосферу и ризоплану. В связи с отмеченным, нами внесено методическое уточнение. В ризосфере выделяли «прикорневую» зону, относя к ней легко отделяющийся от корня субстрат и «корневую» зону – субстрат, плотно прилегающий к корню и отделяющийся при встряхивании, а также зону расположения микроорганизмов, развивающихся непосредственно на корнях растений (смыв с поверхности корня растения). Отдельно был отобран субстрат вне зон влияния корней.

Общее количество микроорганизмов определяли методом люминесцентной микроскопии. Расчет количества клеток (длины мицелия) на 1 г почвы проводили по стандартной формуле:

$$N = S_1 a n / v S_2 c,$$

где N – число клеток (длина мицелия, мкм) на 1 г почвы; S_1 – площадь препарата (мкм²); a – количество клеток, длина мицелия (мкм) в одном поле зрения (усреднение производится по всем препаратам); n – показатель разведения почвенной суспензии (мл); v – объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 – площадь поля зрения микроскопа (мкм²); c – навеска почвы (г) [10].

Количество разных эколого-трофических групп микроорганизмов определили методом разведения почвенной суспензии с последующим высевом ее на плотные питательные среды. Повторность чашек Петри при посевах – трехкратная [10].

Результаты исследований

Формирование травянистого покрова является одним из важнейших показателей интенсивного этапа системы природовосстановления. В варианте 1 полевого опыта растительный покров практически отсутствует при ОПП (общее проективное покрытие) менее 1%. В вариантах 2 и 3 на шестой год ОПП травостоя достигло 80–90%, высота травостоя 30–40 см (генеративные побеги до 80 см). Сохранность сосны в варианте 1 – 38%, в вариантах 2 и 3 – ниже (около 20%), по-видимому, из-за заглушения низкорослых растений сосны травами. Так, высота сосны на шестой год опыта в вариантах составляет 24±2; 26±3; 20±3 см соответственно.

Активное развитие травянистого покрова в вариантах 2 и 3 обеспечило поступление на поверхность субстрата до 300 г/м² биомассы растений. При замедленном разложении в суровых климатических условиях на поверхности субстрата образовался рыхлый слой травянистых остатков («подстилка»), около 1 см. Под ним выделяется слабо уплотненный массой корней растений одернованный слой мощностью около 5–7 см.

Аккумуляция органического углерода в субстрате идет медленно, что согласуется с данными наблюдений других исследователей за преобразованием техногенных субстратов [11, 12]. В вариантах без посева трав (вариант 1) и с посевом трав (вариант 3) содержание органического углерода в

верхнем 5-сантиметровом слое составляет 0.1–0.2 % во все годы опыта. В варианте 2 при внесении 5 т/га органического удобрения (БИАК) содержание органического углерода в верхнем слое субстрата в первый год резко увеличилось – до 0.6%. В последующие годы без повторного внесения органических удобрений оно снижается до 0.2%.

При рассмотрении изменения содержания биогенных элементов следует обратить внимание на существенно большее содержание азота в одернованном слое варианта 2 в сравнении с вариантом 3. Это, возможно, связано с влиянием внесенного ранее органического удобрения (рис. 1).

Сравнивая численность микроорганизмов в ризосфере растений вариантов 1 (контроль) и 2 (с внесением удобрений и посевом трав), следует подчеркнуть существенную разницу между ними. В смыве с корней сосны в варианте 2 численность бактерий примерно в десять раз выше, чем в смыве с корней сосны варианта 1. Это, очевидно, связано с влиянием удобрений (особенно органических) на развитие сосны, а также корневой системы трав на ризосферу сосны. Высокая и примерно равная численность в обоих вариантах спор грибов свидетельствует о неблагоприятных условиях для развития микромицетов, однако в варианте 2 длина

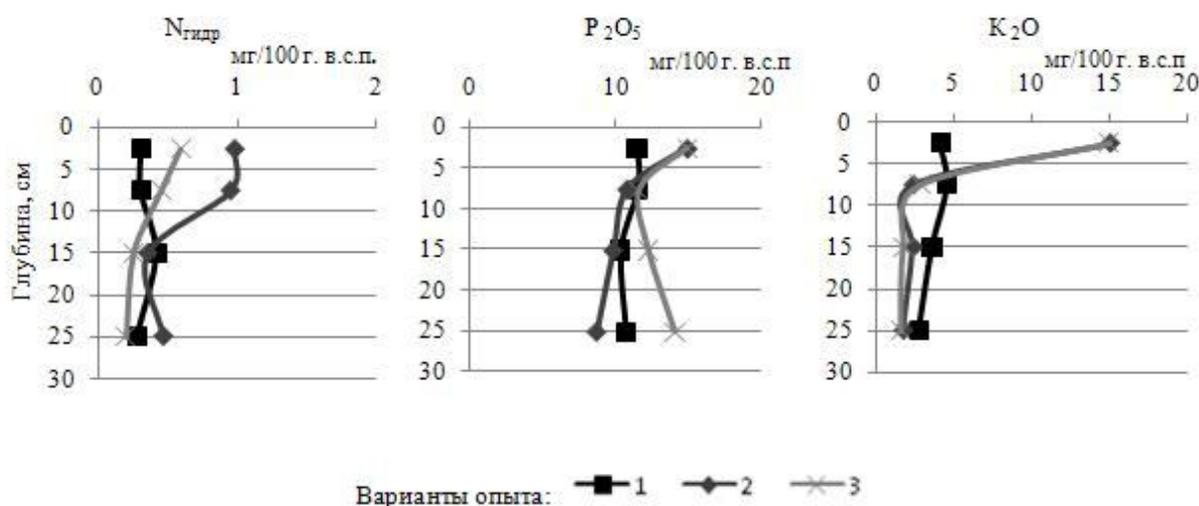


Рис. 1. Профильное распределение элементов-биогенов по вариантам на шестой год опыта (мг на 100 г воздушно-сухой почвы).

Несмотря на прекращение с осени пятого года внесения минеральных удобрений в вариантах 2 и 3, содержание основных элементов питания растений на шестой год опыта в одернованном слое сохраняется высоким. При этом в профильном распределении прослеживается четкое и равное в обоих вариантах увеличение (аккумуляция) оксидов фосфора и калия в одернованном слое, которое под органомным слоем резко снижается. Отмеченное, очевидно, связано с начавшимся развитием биологического круговорота органического вещества.

Накоплению элементов-биогенов в субстрате способствует взаимодействие растений и микробных сообществ в ризосфере. При этом развитие комплекса микроорганизмов ризосферы идет совместно с сукцессией растительного сообщества [13].

Данные микробиологического анализа (табл. 2) показывают, что максимальная численность микроорганизмов отмечена на поверхности корней растений (смыв с корней). В «корневой» и «прикорневой» зонах как у сосны, так и травянистых растений происходит резкое снижение численности микроорганизмов. В зоне вне влияния корней численность микроорганизмов незначительна, т.е. налицо проявляется ризосферный эффект.

грибного мицелия в почве, смывой с поверхности корня, всё же значительно больше, чем в варианте 1 (табл. 2).

Таблица 2

Количественная характеристика комплекса микроорганизмов в почве, г/а.с.п.*

Почвенный образец	Бактерии, млрд. кл.	Споры грибов, млн. кл.	Грибной мицелий, м
Вариант 1			
Смыв с корней сосны	2.17±1.4	12.79±5.6	0.22±0.07
Корневая и прикорневая зоны	0.01±0.007	0.43±0.12	0
Зона вне корней	0	0.22±0.09	0
Вариант 2			
Смыв с корней сосны	19.22±6.8	17.19±3.1	25.03±7.2
Смыв с корней травы	14.78±5.1	12.39±4.6	9.22±2.1
Корневая зона	0.07±0.03	0.28±0.11	0.09±0.02
Прикорневая зона	0	0	0
Зона вне корней	0	0	0

«0» – отсутствие микроорганизмов,

* – абсолютно сухая почва.

Внесение удобрений, в том числе органических, и посев трав в варианте 2 существенно увеличивают численность микроорганизмов в субстрате и активизируют микробиологические процессы, связанные с трансформацией вновь поступающего органического вещества (растительный опад). Иными словами, именно с растениями связано начало формирования субстратной микробиоты, питающейся корневыми выделениями растений. С ризосферы начинается процесс биологического оборота веществ, связывающий все компоненты в систему. В песчаном посттехногенном субстрате эта система еще только начинает развиваться, поэтому максимальная численность микроорганизмов сосредоточена на поверхности корней.

Следует отметить, что общая численность бактерий, полученная методом прямого счета, характеризует лишь потенциальный запас микроорганизмов в исследуемом субстрате и не может указывать на то, в каком состоянии находятся микроорганизмы – активном или неактивном. Одной из важных характеристик почвенной микробиоты является соотношение экологотрофических групп бактерий, позволяющих косвенно судить о биохимических процессах, которые интенсивно протекают в ризосфере и связаны с превращением основных биогенных элементов.

Сравнивая численность и соотношение основных экологотрофических групп бактерий в варианте 1, отметим, что на поверхности корней сосны активно развиваются все группы бактерий, которые участвуют в превращении, поступающего в виде корневых выделений органического вещества (рис. 2).

По мере удаления от корня поступление питательных веществ снижается, что ведет к сокращению численности и замедлению жизнедеятельности микроорганизмов. Это отмечено и другими исследователями микробиоты ризосферы [3, 14, 15].

Изменение численности микроорганизмов и соотношения экологотрофических групп в ризосфере сосны в варианте 2 имеет ту же закономерность, что и в ризосфере сосны в варианте 1 (рис. 3). Однако количественные показатели в варианте 1 в сотни раз ниже.

Активизация процессов преобразования субстрата в ризосфере растений подтвер-

ждается данными агрохимического анализа субстрата. Слабое развитие ризосферных микроорганизмов в варианте 1 пока не может обеспечить преобразование субстрата: содержание основных биогенных элементов $C_{орг.}$ и $N_{гидр.}$ как в ризосфере сосны, так и во внекорневой зоне незначительно – 0.1 % и 0.1-0.2 мг/100 г.возд.-сух.почвы, соответственно. В варианте 2 при примерно одинаковом содержании органического углерода в рассматриваемых зонах, содержание $N_{гидр.}$ различается: 1.8 мг/100 г в.с.п. – в корневой зоне и 1.0 – во внекорневой.

Заключение

Применение двухэтапной схемы природовосстановления на ее «интенсивном» этапе обеспечивает за счет формирования травянистого сообще-

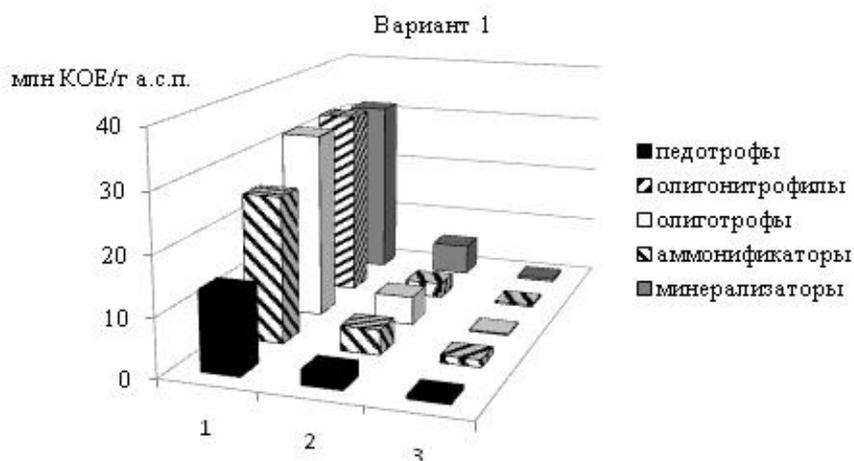


Рис. 2. Эколого-трофические группы бактерий в субстрате варианта 1 (млн. КОЕ/1г абсолютно сухой почвы). 1 – смыв с корней сосны, 2 – корневая и прикорневая зоны, 3 – зона вне корней.

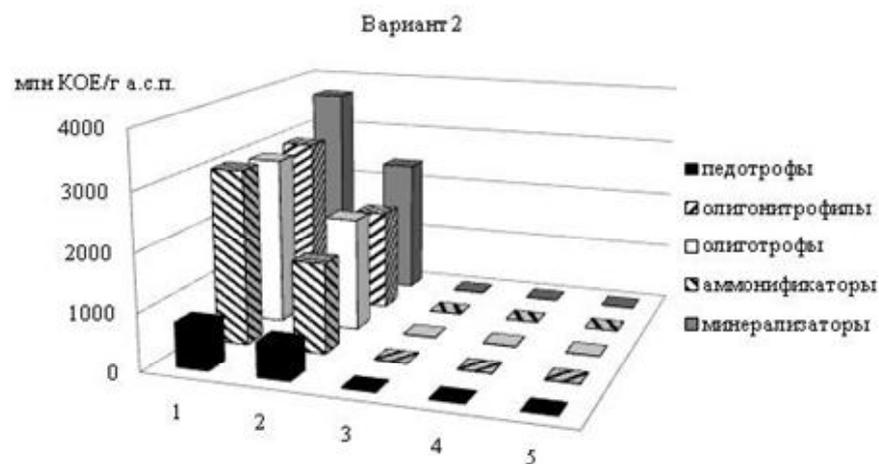


Рис. 3. Эколого-трофические группы бактерий в субстрате варианта 2 (млн. КОЕ/1 г абсолютно сухой почвы). 1 – смыв с корней сосны, 2 – смыв с корней травянистых растений, 3 – «корневая» зона, 4 – прикорневая зона, 5 – зона вне корней.

ства активизацию процесса развития микробного сообщества ризосферы и связанного с этим процесса формирования биогенно-аккумулятивного слоя восстанавливающейся почвы. В результате проведенного исследования установлено, что в варианте 1 (без приемов улучшения субстрата) комплекс микроорганизмов ризосферы семени сосны развит слабо и, как следствие, преобразование субстрата практически не происходит. В ризосфере растений варианта 2 по сравнению с субстратом, лишенным корней, отмечено значительное увеличение количества микроорганизмов и содержания элементов-биогенов, т.е. четко выявляется ризосферный эффект. На шестой год опыта в вариантах 2 и 3 взаимодействие корней растений и микроорганизмов приводит к формированию одернованного слоя с выраженной тенденцией накопления в нем элементов-биогенов.

Таким образом, ризосфера представляет собой систему взаимосвязанных и взаимодействующих между собой компонентов: растения, которые поставляют органическое вещество микроорганизмам, преобразующим корневые выделения растений, и снабжающим доступными элементами питания, самого преобразующегося субстрата. С момента появления на нарушенной землях растений в субстрате начинают проявляться сложные и длительные процессы, совокупное действие которых обуславливает направленность и интенсивность возникающего процесса почвообразования. Результаты полевого опыта позволяют отметить очаговый характер почвообразования, связанный с влиянием ризосферы растений.

Работа выполнена при поддержке Программы РФФИ, проект №3-04-98818 «Ускоренное восстановление лесных экосистем на посттехногенных территориях таежной зоны Республики Коми».

Литература

1. Арчегова И.Б. Эффективная система природо-восстановления – основа перспективного природопользования на Крайнем Севере. Сыктывкар, 1998. 12 с. (Научные доклады / Коми НЦ УрО РАН; Вып. 412).
2. Rovira A.D. Plant root exudates // The Botanical Review, 1969. Vol. 35. № 1. P. 35–37.
3. Kennedy A.C. The rhizosphere and spermosphera // Principles and applications of soil microbiology. New Jersey: Prentice Hall, 1998. P. 389–407.
4. Brown G.D., Rovira A.D. The rhizosphere and its management to improve plant growth // Adv. Agron. 1999. Vol. 66. P. 1–102.
5. *Возможности современных и будущих фундаментальных исследований в почвоведении* / Под ред. В.О.Таргульяна. М.: ГЕОС, 2000. С. 72–74.
6. *Агрохимические методы исследования почв* / Под ред. А.В.Соколова, Д.Л.Аскинази, И.П.Сердобольского. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 556 с.
7. *Теория и практика химического анализа почв* / Под ред. Л.А.Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
8. Теннер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Т.И. Практикум по микробиологии. М.: Колос, 1993. 175 с.
9. Мишустин Е.Н., Емцев В.Т. Микробиология. М.: Изд-во «Агропромиздат», 1987. 368 с.
10. *Методы почвенной микробиологии и биохимии* / Под ред. Д.Г.Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
11. Абакумов Е.В. Накопление и трансформация органического вещества на разновозрастных отвалах песчаного карьера // Почвоведение. 2008. №8. С. 955–963.
12. Железнова Г.В., Кузнецова Е.Г., Евдокимова Т.В., Турубанова Л.П. Мониторинг формирования растительного покрова на техногенно-нарушенных территориях Усинского нефтяного месторождения // Экология. 2005. № 4. С. 269–274.
13. Узбек И.Х. Развитие корней и интенсивность их разложения в толще рекультивируемых почв // Почвоведение. 1995. № 9. С. 1132–1136.
14. Мишустин Е.Н. Микроорганизмы и плодородие почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 247 с.
15. Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 218 с.

Статья поступила в редакцию 14.06.2012.

УДК 547.458:577114:615.276

ВЫДЕЛЕНИЕ И ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕКТИНОВЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ ИЗ ПЛОДОВ КАЛИНЫ САРЖЕНТА *Viburnum sargentii* КОЕХНЕ

Т.В. ЧЕРНЯК*, В.В. ГОЛОВЧЕНКО**

*Дальневосточный государственный медицинский университет Минздрава РФ, г. Хабаровск

**Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН, г.Сыктывкар
ctaya@yandex.ru

Из плодов калины Саржента были выделены полисахаридные фракции, содержащие пектиновые полисахариды со значительными областями линейного 1,4- α -D-галактуронана. Установлено, что полученные фракции гетерогенны по составу и представляют собой смесь полимергомологов, различающихся количеством остатков галактуроновой кислоты. Показано, что в состав всех фракций входит белок, часть которого, вероятно, связана с углеводной составляющей.

Ключевые слова: калина Саржента, пектиновые полисахариды, галактуронан, арабиногалактаны

T.V. CHERNYAK, V.V. GOLOVCHENKO. ISOLATION AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF PECTIC POLYSACCHARIDES FROM THE FRUITS OF VIBURNUM SARGENTII KOEHNE

The polysaccharide fractions were successively extracted with water, aqueous solutions of hydrochloric acid (pH 4.0) and 0.5% aqueous of ammonium oxalate from *Viburnum sargentii* fruits. All polysaccharide fractions included the pectic polysaccharides with significant regions of 1,4- α -D-galacturonan. The composition of polysaccharide fractions was heterogeneous. The pectic polysaccharides from *V. sargentii* were shown to be a mixture of polymer homologues, which differed in the content of the galacturonic acid residues. The fractions were found to contain protein. Protein was supposed to be partly linked to the sugar chains of the carbohydrate macromolecules.

Key words: *Viburnum sargentii*, pectic polysaccharides, galacturonan, arabinogalactan

Введение

Целлюлоза, гемицеллюлозы и пектиновые полисахариды являются главными компонентами растительной клеточной стенки. Пектиновые полисахариды совместно с гемицеллюлозами образуют матрицу, в которую встроены микрофибриллы целлюлозы. Взаимодействие между полисахаридами обеспечивает не только устойчивые, но и динамичные и гибкие свойства клеточной стенки [1, 2]. Среди полисахаридов клеточных стенок высших растений пектиновые полисахариды являются наиболее сложными и интересными с точки зрения структурной организации и функциональной активности. Они выполняют различные биологические функции в растениях [2] и обладают разноплановой физиологической активностью [3]. Расширение знаний о различии пектиновых полисахаридов растений разных видов и о влиянии условий их произрастания необходимо для понимания функций и роли этих биополимеров в растительной клетке.

В данной работе проведено сравнение пектиновых полисахаридов, выделенных из плодов калины Саржента *Viburnum sargentii* Koehne (сем. *Caprifoliaceae*), произрастающей в умеренном муссонном климате Дальнего Востока, и ранее выделенных и охарактеризованных пектиновых полисахаридов плодов калины обыкновенной *Viburnum opulus* L., произрастающей в континентальном климате Башкортостана [4]. Проведенные сравнительные исследования плодов дальневосточного и европейского видов калины показали сходство качественного и количественного содержания флавоноидов, антоцианов, катехинов, органических, амино- и жирных кислот [5]. Вместе с тем выявлено различие в количественном содержании оксикоричных кислот [5].

Материалы и методы

Растительный материал. Плоды калины Саржента были собраны в сентябре 2011 г. на территории Амурской области в окрестностях г. Белогорска. После предварительного подвяливания вы-

сушены с применением инфракрасной суши и измельчены до частиц размером 3 мм.

Общие аналитические методы. Определение количественного содержания белка проведено методом Лоури [6], используя в качестве стандарта бычий сывороточный альбумин (БСА). Общее содержание гликуроновых кислот уточняли спектрофотометрическим методом по реакции с 3,5-диметилфенолом в присутствии концентрированной серной кислоты [7]. Для построения калибровочной кривой использовали галактуроновую кислоту. Определение степени метилэтерификации проводили по методу, описанному ранее [8], используя метиловый спирт в качестве стандарта. Спектрофотометрические измерения выполняли на спектрофотометре марки Ultrospec 3000 (Pharmacia Biotech, England).

Для определения количественного содержания нейтральных моносахаридов в гидролизатах использован метод газожидкостной хроматографии (ГЖХ) на хроматографе Varian 450-GC (США) с пламенно-ионизационным детектором на капиллярной колонке VF-5 ms (Varian, США; 0.25 мм, 30 м), газ-носитель – гелий. Температурный режим: от 175°C (1 мин) до 250°C (2 мин) со скоростью 3°C/мин.

Для распределительной нисходящей бумажной хроматографии (БХ) использовали систему растворителей *n*-бутанол : пиридин : вода (6:4:3) бумага Filtrak FN №3 (Германия). Идентификацию моносахаридов проводили с помощью раствора кислого анилинфталата при температуре 105°C. Для сравнения применялся стандарт, содержащий галактуроновую кислоту. Все растворы упаривали на ротационном испарителе марки Laborota 4002 (Heidolph, Germany) при пониженном давлении и температуре 40–45°C. Для лиофилизации водных растворов использовали лиофильную сушку марки VirTis (США).

Выделение вибурнанов. Сырье (700 г) предварительно обрабатывали хлороформом в аппарате Сокслета, сушили, заливали водой (4 л). Экстракцию проводили при 80°C в течение 5 ч. Остаток сырья отделяли центрифугированием. Экстракт концентрировали, диализовали против дистиллированной воды при 10°C в течение трех суток. Полученный диализат центрифугировали, концентрировали до 100 мл и при перемешивании выливали в 95%-ный этиловый спирт (300 мл). Осаждение полисахаридов проводили при 10°C в течение 3 ч. Полисахариды отделяли центрифугированием, осадок растворяли в дистиллированной воде (70 мл) и лиофилизовали. В результате получили фракцию VS1 с выходом 1.55%.

Остаток сырья заливали дистиллированной водой и подкисляли соляной кислотой до pH 4.0. Экстракцию проводили при 50°C в течение 5 ч. Экстракт обрабатывали, как описано выше. В результате получили фракцию VS2 с выходом 0.38%.

Остаток сырья заливали 0.5%-ным водным раствором оксалата аммония. Экстракцию проводили при 70°C в течение 5 ч. Экстракт обрабатывали по вышеописанной методике. В результате получили фракцию VS3 с выходом 0.40%.

Определение гомогенности вибурнанов. Для определения гомогенности выделенных полисахаридных фракций использовали метод ионообменной хроматографии на DEAE-целлюлозе (СГ-форма). Навеску полисахарида (80 мг) растворяли в дистиллированной воде (5 мл), наносили на колонку (40×2.7 см), элюирование проводили в изократическом режиме водными растворами натрия хлорида возрастающей концентрации (0.01, 0.2, 0.3, 1.0 М). Разделение выполняли при скорости элюента 48 мл/час, отбирая фракции по 12 мл. Выход полисахаридных фракций контролировали по реакции элюата на углеводы по методу Смита [8]. Фракции, содержащие полисахариды, объединяли, концентрировали, диализовали и лиофилизовали. При разделении фракции VS1 получили полисахариды VS1-1, VS1-2, VS1-3, VS1-4; фракции VS2 – VS2-1 и VS2-2; фракции VS3 – VS3-1, VS3-2.

При определении средневесовой и среднечисловой молекулярной массы образцов использовали метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), используя хроматографическую систему (Shimadzu, Япония): насос LC-20AD, дегазатор DGU-20A₃, рефрактометр RID-10A, термостат CTO-20A, колонку Shodex OHpak SB-804 HQ (8.0 мм × 30 см), предколонку Shodex GS-26 7B (7.6 мм × 5 см). Элюирование проводили 0.15 М NaCl (40°C, 0.3 мл/мин).

Полный кислотный гидролиз. Навеску полисахарида (2.5; 5 мг) нагревали 5 ч при 100°C с 2 М трифторуксусной кислотой (TFA) (1 мл), содержащей мио-инозит (0.5 и 1 мг/мл соответственно) в качестве внутреннего стандарта. Кислоту удаляли многократным упариванием с метанолом. Моносахариды восстанавливали и ацетиловали, после чего их идентифицировали методом ГЖХ в виде соответствующих ацетатов полиолов.

Ферментативный гидролиз. Навеску полисахарида (20 мг) растворяли в воде (20 мл), добавляли 1,4- α -D-полигалактуронозу (Sigma, USA) (5 мг), предварительно растворенную в 0.05 мл дист. воды. Смесь оставляли на ночь при комнатной температуре (25°C). Фермент дезактивировали кипячением при 100°C и удаляли центрифугированием. Раствор концентрировали до 10 мл и выливали в 96%-ный этиловый спирт (30 мл). Осадок отделяли центрифугированием. Спиртовой супернатант концентрировали и вычисляли наличие в нем галактуроновой кислоты с помощью БХ.

Определение содержания белка, уоновых кислот и нейтральных моносахаридов, а также степени метилэтерификации проводили в трех параллельных измерениях. При обработке данных вычисляли среднее арифметическое значение и среднее квадратичное отклонение. Достоверность результатов оценивали по *t*-критерию Стьюдента.

Результаты исследований

Из высушенных и обработанных хлороформом ягод калины Саржента последовательной экстракцией выделены фракции, содержащие растворимые пектиновые полисахариды (VS1), и пектиновые полисахариды, входящие в состав протопектинового комплекса

(VS2 и VS3). Пектиновые полисахариды составляют до 30% от сухой биомассы двудольных, голосеменных и однодольных растений [9] и входят в состав растительной клетки в двух формах – растворимой и нерастворимой (в составе протопектинового комплекса). Растворимые пектины локализованы в вакуоли и срединной пластине. Протопектиновый комплекс образует основу первичной клеточной стенки растений [10]. Выход фракции VS1 существенно выше, чем фракций VS2 и VS3 (табл. 1), что свидетельствует о превалирующем содержании в ягодах калины растворимых пектиновых полисахаридов. В онтогенезе растений происходят изменения в содержании пектинов и соотношении растворимых пектинов и протопектинов. В частности, при созревании плодов в них увеличивается количество растворимого пектина [11].

Считается, что пектиновые полисахариды имеют блочный характер строения углеводной цепи и чаще всего содержат три основных блока, в каждом из которых – остатки галактурановой кислоты GalA в больших или меньших количествах [12]. Для подтверждения наличия 1,4- α -D-галактуранона в составе углеводных цепей полисахаридов выделенных фракций использовали метод ферментативного гидролиза 1,4- α -D-галактопиранозилураназой, избирательно гидролизующей 1,4-связи между остатками α -D-галактурановой кислоты. Установлено, что ферментативный гидролиз приводит к значительной деструкции углеводных цепей полисахаридов, входящих в состав всех выделенных фракций (около 50%), которая сопровождается образованием свободной галактурановой кислоты. Это доказывает принадлежность углеводной части

Таблица 1

Характеристика пектиновых фракций плодов калины Саржента

Фракция	Выход, %*	СМ**, %	Содержание, %***							
			GalA	Ara	Gal	Rha	Xyl	Man	Glc	Белок
VS1	1.6	22.2±1.4	53.1±1.5	5.9±0.7	4.5±0.3	1.1±0.3	2.4±0.5	0.3±0.08	1.0±0.09	41.8±2.1
VS2	0.4	28.9±0.9	56.9±1.4	5.7±0.7	5.8±0.5	1.5±0.3	3.1±0.3	0.2±0.05	0.9±0.05	32.5±1.3
VS3	0.4	25.5±0.8	73.9±1.6	4.0±0.3	2.8±0.3	1.0±0.2	3.7±0.3	0.5±0.05	0.5±0.05	18.5±1.1

Примечание. * – от массы воздушно-сухого растительного материала; ** – степень метилэтерификации, показывает процент метилэтерифицированных остатков галактурановой кислоты; *** – весовые проценты.

Выделенные полисахаридные фракции были охарактеризованы по моносахаридному составу, гомогенности и содержанию белка. Определение моносахаридного состава полисахаридов, входящих в состав выделенных фракций, проводили спектрофотометрическим методом и методом ГЖХ. Установлено, что из ягод калины Саржента экстрагируются кислые полисахариды, с типичным для пектинов моносахаридным составом, но различаются соотношением остатков галактурановой кислоты и нейтральных моносахаридов (табл. 1). Спектрофотометрическим методом показано, что главным компонентом углеводной части всех выделенных фракций являются остатки галактурановой кислоты (табл. 1). Методом ГЖХ после полного кислотного гидролиза фракций 2 М TFA и последующего получения ацетатов полиолов установлено, что доминирующими нейтральными моносахаридами всех фракций являются арабиноза (Ara), галактоза (Gal) и ксилоза (Xyl). Сравнение данных по t-критерию Стьюдента доказывает достоверность этого утверждения. В качестве минорных компонентов в составе углеводных цепей пектинов идентифицированы остатки рамнозы (Rha), маннозы (Man), глюкозы (Glc), общее содержание которых составляет менее 3%. Ранее показано, что при последовательной экстракции из ягод калины обыкновенной *V. Opulus*, наряду с пектиновыми полисахаридами, экстрагируются галактоманнаны, содержание которых составляет 0.1% от массы сухого растительного материала [4].

выделенных фракций к классу пектиновых полисахаридов. Установлено, что часть остатков галактурановой кислоты, входящих в область галактуранона, метилэтерифицирована (табл. 1).

Ионообменной хроматографией на DEAE-целлюлозе (СГ-форма) показано, что все полученные фракции гетерогенны по составу (табл. 2). Фракция VS1 включает четыре пектиновых полисахарида VS1-1, VS1-2, VS1-3 и VS1-4, которые элюируются 0.01, 0.2, 0.3 и 1.0 М растворами NaCl соответственно. Полученные пектины представляют собой полимергомологи и различаются содержанием остатков галактурановой кислоты. Фракция VS1-1, элюирующаяся 0.01 М раствором NaCl, отличается повышенным содержанием остатков арабинозы и галактозы. Фракции VS2 и VS3 включают по два пектиновых полисахарида, характеризующихся высоким содержанием галактурановой кислоты (табл. 2). Во всех фракциях, полученных ионообменной хроматографией, за исключением VS2-2, содержится белок, что может указывать на наличие ковалентной связи между углеводной и белковой составляющими.

При сравнении полученных результатов исследования полисахаридов, выделенных из ягод калины дальневосточного вида *V. sargentii* и данных по исследованию полисахаридов, выделенных ранее из ягод калины европейского вида *V. opulus* [4], установлено, что, экстрагируемые водой фракции включают пектиновые полисахариды со сходным моносахаридным составом, в то время как фрак-

Таблица 2

Характеристика пектиновых полисахаридов, полученных ионообменной хроматографией на DEAE-целлюлозе

Фракция	C _{NaCl} , М	Выход, %*	Содержание, %**								
			GalA	Ara	Gal	Rha	Xyl	Man	Glc	Белок	
VS1	VS1-1	0.01	21.7	28.1±1.1	12.1±0.6	12.1±0.6	2.4±0.3	1.9±0.2	0.5±0.06	1.4±0.2	25.6±1.6
	VS1-2	0.2	7.4	56.0±1.8	2.2±0.1	3.2±0.2	1.1±0.1	2.8±0.3	0.1±0.05	0.8±0.1	17.1±0.8
	VS1-3	0.3	12.0	63.6±2.4	1.1±0.06	1.1±0.15	0.7±0.08	0.5±0.1	0.2±0.05	1.0±0.1	3.1±0.1
	VS1-4	1.0	3.7	77.6±2.3	2.6±0.1	1.7±0.2	0.6±0.08	0.6±0.1	0.2±0.05	0.6±0.08	10.6±1.2
VS2	VS2-1	0.2	21.5	77.0±2.3	5.2±0.2	4.7±0.3	1.3±0.15	5.8±0.5	0.2±0.05	0.7±0.08	3.1±0.1
	VS2-2	0.3	27.9	87.5±2.8	1.4±0.09	1.7±0.15	0.6±0.07	2.7±0.3	0.1±0.05	0.4±0.05	0
VS3	VS3-1	0.1	13.4	62.5±2.1	3.8±0.2	3.9±0.2	0.5±0.05	2.0±0.3	0.2±0.05	0.8±0.09	8.1±0.8
	VS3-2	0.2	39.5	73.0±2.3	1.9±0.1	1.9±0.6	0.7±0.05	2.6±0.3	0.3±0.05	0.6±0.08	4.7±0.2

Примечание. * – от массы, нанесенной на колонку навески; ** – весовые проценты.

Таблица 3

Результаты ВЭЖХ анализа полисахаридных фракций

№ пика	Площадь пика, %	Mn, кДа	Mw, кДа	Mw/Mn
VS1 (индекс полидисперсности – 43)				
1	52.9	90.7	282.6	3.1
2	10.8	16.6	17.4	1.0
3	21.2	4.7	5.9	1.3
4	15.1	0.7	1.0	1.4
VS2 (индекс полидисперсности – 21)				
1	94.7	22.0	206.9	9.4
2	5.3	0.8	1.0	1.2
VS3 (индекс полидисперсности – 23)				
1	36.2	96.3	253.4	2.6
2	28.6	8.9	16.0	1.8
3	22.8	3.8	4.4	1.2
4	12.4	0.8	1.1	1.3

ции, полученные экстракцией водным раствором соляной кислоты и оксалата аммония, существенно различаются. В состав фракций, выделенных из плодов калины обыкновенной, входят галактоманнаны [4], в то время как фракции, выделенные из плодов калины Саржента, содержат исключительно пектиновые полисахариды. Установленные различия в полисахаридном составе ягод калины могут быть связаны с видовой принадлежностью растений, условиями их произрастания, и с периодом вегетации и фазой роста калины. Выявление факторов, влияющих на содержание полисахаридов, требует дальнейшего исследования.

В составе всех выделенных фракций – значительное количество белка (до 21%). Присутствие белка во фракциях закономерно, поскольку белки входят в состав клеточной стенки растений наряду с полисахаридами и ароматическими соединениями [10]. Хотя ранее наличие белков в растительной клеточной стенке подвергалось сомнению [13]. К настоящему времени установлено, что белки входят в состав клеточной стенки и как структурные компоненты, и как ферменты [14]. Белки могут быть связаны с пектинами через боковые цепи RG-I посредством связей, образованных через остатки галактозы и арабинозы [15]. Такие сшивки обеспечивают клеточной стенке дополнительную структурную и функциональную прочность.

Для определения средневесовой (Mn) и среднечисловой (Mw) молекулярной массы использовали метод ВЭЖХ. Полученные результаты представлены в табл. 3. Установлено, что все фракции характеризуются высокой степенью полидисперсности (Mw/Mn). Индекс полидисперсности фракции VS1 составил 43, VS2 – 21, VS3 – 23. На выходных кривых всех фракций наблюдается несколько пиков, характеризующихся различными молекулярными массами, что свидетельствует о гетерогенности выделенных фракций. Несмотря на то, что полученные полисахариды имеют низкую степень метилэтерификации остатков галактуроно-

вой кислоты (табл. 1), относительно невысокая молекулярная масса входящих в состав фракций пектиновых макромолекул определяет их хорошую растворимость в воде.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены различия полисахаридного состава ягод двух близкородственных видов калины – европейского и дальневосточного. В плодах калины Саржента и калины обыкновенной синтезируются близкие по моносахаридному составу пектиновые полисахариды. Однако в плодах дальневосточного вида не обнаружены галактоманнаны, наличие которых показано ранее в ягодах калины обыкновенной. Выявление факторов, которые определяют различия в содержании полисахаридов близкородственных видов калины, требует дальнейшего детального исследования.

Литература

1. *Carpita N.C., Gibeaut D.M.* Structural models of primary-cell walls in flowering plants – consistency of molecular-structure with the physical-properties of the walls during growth // *Plant J.* 1993. Vol. 3. P. 1–30.
2. *Горшкова Т.А.* Растительная клеточная стенка как динамичная система. М.: Наука, 2007. 429 с.
3. *Попов С.В.* Иммуномодулирующее действие пектиновых полисахаридов: Дис. ... д-ра биол. наук. Владивосток, 2010. 247 с.
4. *Выделение и предварительное исследование строения и физиологической активности водорастворимых полисахаридов из шрота ягод калины обыкновенной *Viburnum opulus** / Р.Г. Оводова, В.В. Головченко, С.В. Попов, А.С. Шашков, Ю.С. Оводов // *Биоорганическая химия.* 2000. Т. 26. № 1. С. 61–67.
5. *Виды флоры Дальнего Востока России, викарные к официальным* / Т.А. Степанова, А.В. Каминская, А.И. Деркач, Н.Ф. Комисаренко // *Растит. ресурсы.* 1998. №3. С. 21–34.
6. *Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J.* Protein measurement with the Folin-Phenol reagents // *J. Biol. Chem.* 1951. Vol. 193. P. 265–275.
7. *Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K. et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances // *Analyt. Chem.* 1956. Vol. 28. P. 350–356.
8. *Wood P.Y., Siddiqui I.R.* Determination of methanol and its application to measurement of pectic ester content and pectin methyl esterase activity // *Analyt. Biochem.* 1971. Vol. 39. P. 418–423.
9. *Ridley B., O'Neill M., Mohnen D.* Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling // *Phytochemistry.* 2001. Vol. 57. P. 929–967.
10. *Caffall K. H., Mohnen D.* The structure, function, and biosynthesis of plant cell wall pectic polysaccharides // *Carbohydr. Res.* 2009. Vol. 344. P. 1879–1900.
11. *Донченко Л.В.* Технология пектина и пектинопродуктов. М.: ДеЛи, 2000. 256 с.
12. *Willatsa W.G.T., Knox J.P., Mikkelsen J.D.* Pectin: new insights into an old polymer are starting to gel // *Trends in Food Science & Technology.* 2006. Vol. 17. P. 97–104.
13. *Lamport D.T.A.* The protein component of primary cell walls // *Adv. Bot. Res.* 1965. Vol. 2. P. 151–218.
14. *Fry S.C.* The growing plant cell wall: chemical and metabolic analysis. L.: Lohgman, 1988. 333 p.
15. *McNeil M., Darvill A.G., Albersheim P.* Structure of plant cell walls: X. Rhamnogalacturonan-I, a structurally complex pectic polysaccharide in the walls of suspension-cultured sycamore cells // *Plant Physiol.* 1980. Vol. 66. P. 1128–1134.

Статья поступила в редакцию 29.05.2012.

УДК 612.17

ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЕЙСТВИЯ КЛЕТОК ТИПА СКРЫТОГО ВОДИТЕЛЯ РИТМА СЕРДЦА КРОЛИКА И МЫШИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛИДОКАИНА

Е.А. ЛЕБЕДЕВА

*Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
lebedeva@physiol.komisc.ru*

Эффекты лидокаина, блокатора Na^+ -каналов, на клетки, работающие в режиме скрытого водителя ритма, синусно-предсердного (СП) узла кролика и мыши, были исследованы с помощью стандартной микроэлектродной техники. Эксперименты показали, что лидокаин дозозависимо замедлял скорость фазы быстрой деполяризации (dV/dt_{\max}) потенциала действия у кролика и мыши. Полученные результаты свидетельствуют о значительном вкладе Na^+ -каналов в формирование фазы быстрой деполяризации клеток СП области.

Ключевые слова: синусно-предсердный узел, лидокаин, ионные каналы, кролик, мышшь

E.A. LEBEDEVA. ELECTROPHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF ACTION POTENTIALS OF LATENT PACEMAKER CELLS OF RABBIT AND MOUSE HEART UNDER THE INFLUENCE OF LIDOCAINE

The effects of lidocaine on the latent pacemaker cells of sinoatrial (SP) node of rabbit and mouse were studied using standard microelectrode technique. Experiments have shown that lidocaine dose-dependently slows down the AP fast depolarization phase (dV/dt_{\max}) in rabbit and mouse. The results obtained testify to considerable contribution of Na^+ -channels in formation of cells fast depolarization phase of sinoatrial area.

Key words: sinoatrial node, lidocaine, ion channels, rabbit, mouse

Синусно-предсердный (СП) узел представляет собой группу клеток, способных самостоятельно генерировать импульсы без участия нервной системы, что обеспечивает одно из главных свойств сердца – автоматию. В отличие от потенциала действия (ПД) клеток рабочего миокарда, клетки СП узла имеют фазу медленной диастолической деполяризации (МДД), которая при достижении порога и переходит в ПД. Несмотря на продолжительное изучение, механизмы, лежащие в основе генерации пейсмекерной активности, до сих пор не установлены.

В частности, до конца не ясна роль Na^+ -каналов. Долгое время считалось, что ионы натрия не участвуют в фазе быстрой деполяризации и значение Na^+ -тока в пейсмекерной активности клеток СП узла незначительно [1, 2]. Недавние исследования показали, что, кроме сердечной изоформы $\text{Na}_v1.5$ Na^+ -каналов, в СП узле также присутствует и нейрональная изоформа $\text{Na}_v1.1$, которая располагается равномерно по всему СП узлу и имеет более высокую чувствительность к блокаторам, чем сердечная изоформа [3, 4]. Кроме того, мутация гена *Scn5a*, кодирующего Na^+ -каналы, была найдена у многих пациентов с синдромом слабости СП узла [5].

Лидокаин – один из блокаторов потенциалзависимых Na^+ -каналов, антиаритмик I класса, широко применяемый в кардиологической практике и в качестве локального анестетика. Однако механизм его действия на клетки синусно-предсердной области до сих пор до конца не ясен. Эксперименты на изолированных предсердиях крыс показали, что лидокаин слабо снижает частоту генерации спонтанного ритма [6]. Но работы, проведенные на изолированных миоцитах СП узла кролика [7] и изолированном СП узле мыши [8], демонстрируют более сильное влияние лидокаина на пейсмекерную активность клеток этой области.

Таким образом, цель нашей работы заключалась в исследовании Na^+ -тока, участвующего в формировании фазы быстрой деполяризации, а также динамики изменения других электрофизиологических параметров ПД при различных концентрациях лидокаина у кролика и мыши.

Материал и методы

Опыты проводили на кроликах породы Шиншилла (возраст 6–7 месяцев, масса тела 3,0–3,5 кг) и белых мышях (возраст 8–16 недель, масса тела

30±5 г). Животных наркотизировали введением золетила (кролики, 15 мг/кг массы тела) и в парах эфира (мыши). Экспериментальный протокол был одобрен комиссией по биологической этике Института физиологии Коми НЦ УрО РАН. Сердце извлекали и помещали в растворе Тироде следующего состава (мМ/л): 140 NaCl; 10 NaHCO₃; 5,4 KCl; 1,8 CaCl₂; 1 MgSO₄; 0,33 Na₂HPO₄, 10 глюкоза; 5 HEPES (рН 7,4). Удаляли желудочки и предсердия. В результате препарат имел размер 3х3 мм и включал область синусно-предсердного узла, фрагмент правого предсердия с поперечным гребешком (*crista terminalis*) и сегменты верхней и нижней полых вен (*superior u inferior vena cava*). Препарат помещали в проточную, аэрируемую, термостатируемую камеру, заполненную раствором Тироде при температуре 31±1°C. Эффекты лидокаина регистрировали на протяжении 15 мин экспозиции.

Регистрацию внутриклеточных ПД проводили с помощью стандартной микроэлектродной техники. Обработку результатов выполняли с помощью программ Microsoft Office Excel и PowerGraph Professional версия 3.3 (Россия). Данные приведены как среднее арифметическое ± стандартное отклонение (M±σ). Достоверность различий определяли по U-критерию Манна-Уитни. Различия считали достоверными при 0,01 < p < 0,05.

Результаты исследований

Общая характеристика ПД клеток скрытого водителя ритма кролика и мыши. Синусно-предсердная область состоит из клеток, электрофизиологические параметры которых различаются в зависимости от места регистрации. В наших экспериментах ПД клеток были зарегистрированы вдоль артерии СП узла, ниже поперечного гребешка (рис. 1). Частота генерирования ПД у спонтанно сокращающихся препаратов была равна 108±22 имп / мин (n=6) и 316±40 имп/мин (n=20) у кролика и мыши соответственно. В контрольном растворе Тироде скорость фазы быстрой деполяризации у пейсмекерных клеток в этой области у кролика составила 9±3 В/с и 16±5 В/с у мыши. Место регистра-

ции ПД и высокая скорость фазы быстрой деполяризации позволяют отнести эти клетки к клеткам, работающим в режиме скрытого водителя ритма.

Эффекты лидокаина на фазу быстрой деполяризации (фаза 0) ПД у кролика и мыши. Дозозависимый эффект лидокаина, блокатора Na⁺-каналов, исследован в диапазоне от 5 до 1000 мкМ (рис. 2). Установлено, что пороговая концентрация лидокаина для клеток, работающих в режиме скрытого водителя ритма, составила 100 мкМ (n=4) для кролика и 12 мкМ (n=4) для мыши. У обоих видов животных происходило замедление скорости нарастания фазы быстрой деполяризации (dV/dt_{max}) на 24% (p<0,05) и 35% (p<0,05) соответственно. При этом частота генерации ПД уменьшалась незначительно (у мыши на 13% (p<0,05), у кролика не было отмечено достоверных изменений).

При дальнейшем повышении концентрации лидокаина происходило дозозависимое снижение dV/dt_{max} у обоих видов животных (рис. 2). Анализ дозозависимой кривой показал, что концентрация лидокаина, при которой происходит снижение максимальной скорости деполяризации ПД в фазу 0 на 50% (EC₅₀) у клеток синусно-предсердного узла кролика, составила ≈230 мкМ, у мыши – ≈ 20 мкМ. При высоких концентрациях блокатора (1000 мкМ) у кролика наблюдается монотонное замедление dV/dt_{max}, снижение амплитуды ПД, смещение максимального диастолического потенциала (E_{max}) в сторону деполяризации и блок генерации ПД на 7-й мин экспозиции (n=5). У клеток СП узла мыши блок спонтанной активности происходил в течение 3 мин (n=3) после добавления лидокаина (1000 мкМ). При удалении блокатора из перфузирующего раствора спонтанная активность препаратов возобновлялась через 5–10 мин.

Лидокаин представляет собой селективный блокатор Na⁺-каналов. На нейронах крысы показано, что лидокаин (1000 мкМ) полностью блокирует Na⁺-каналы и генерацию ПД [9]. Однако ряд исследователей свидетельствуют, что кроме Na⁺-каналов местный анестетик действует на несколько типов Ca²⁺- и K⁺-каналов [9]. В нейронах концентрация ли-

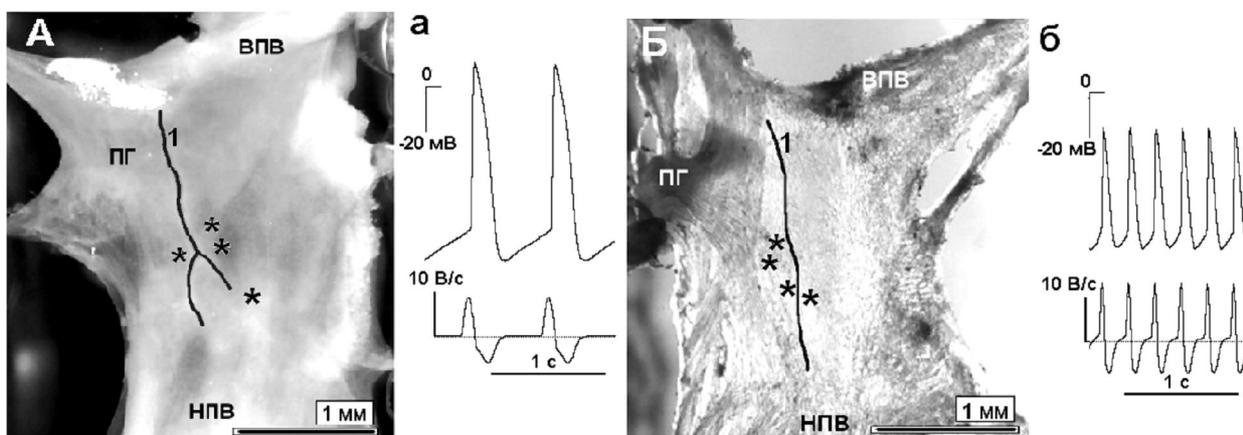


Рис. 1. Препараты синусно-предсердной области кролика (А) и мыши (Б) и потенциалы действия с первой производной (а, б). Примечание: ВПВ – верхняя полая вена; НПВ – нижняя полая вена; ПГ – поперечный гребешок; 1 – артерия синусно-предсердного узла; * – зона регистрации ПД типа скрытого водителя ритма.

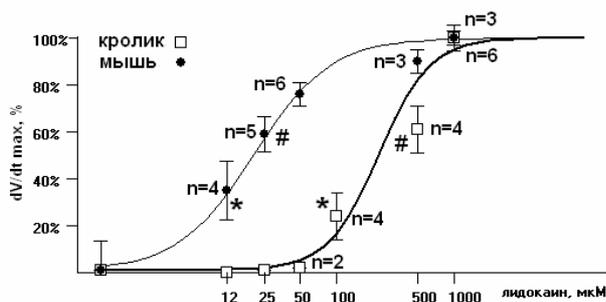


Рис. 2. Дозозависимый эффект лидокаина на скорость нарастания фазы быстрой деполяризации (dV/dt_{max}) ПД у кролика и мыши.

* – достоверность различий по сравнению с контролем ($p < 0,05$); # – достоверность различий по сравнению с * ($p < 0,05$).

докаина, которая блокирует Ca^{2+} -каналы на 50% (EC_{50}), составляет $\approx 2,8$ мМ [9]. Сродство K^+ -каналов к действию лидокаина зависит от типа самого канала и примерно в 10 – 80 раз ниже, чем для Na^+ -канала [10]. Это в несколько раз больше, чем требуется для полной блокады Na^+ -каналов.

Таким образом, остановка генерации ПД в клетках СП узла кролика и мыши связана с полным блоком Na^+ -каналов. Однако стоит отметить, что чувствительность пейсмекерных клеток к низким концентрациям блокатора у этих животных различна. Возможно, что различие в чувствительности клеток к действию лидокаина (\approx в 10 раз) связано с разным соотношением сердечной ($Na_v1.5$) и нейрональной ($Na_v1.1$) изоформ Na^+ -каналов, большим вкладом быстрого компонента Na^+ -тока в генерацию пейсмекерной активности в СП узле мыши или в особенностях в строении ионных каналов ($Na_v1.5$ и $Na_v1.1$) на молекулярном уровне у этих животных.

Эффекты лидокаина на фазу медленной диастолической деполяризации (фаза 4) ПД у кролика и мыши. В низких концентрациях (100 мкМ для кролика и 12 мкМ для мыши) лидокаин не влиял на длительность и скорость фазы МДД. Повышение концентрации блокатора (500 мкМ для кролика, $n=4$; 25 мкМ для мыши, $n=5$) приводило к замедлению скорости фазы МДД (V_4) у мыши на 21% ($p < 0,05$). В клетках СП узла кролика V_4 достоверно не изменялась, но E_{max} смещался в сторону деполяризации (на 21%). В результате частота генерации ПД снижалась на 23 и 27% у кролика и мыши соответственно (рис. 3).

В экспериментах на изолированных клетках СП узла кролика Rocchetti и соавт. [7] показали, что лидокаин может блокировать

каналы HCN, по которым идет ток, активируемый гиперполяризацией (I_f), способствующий фазе МДД.

Наши результаты также демонстрируют изменение фазы МДД при действии лидокаина, однако механизм действия блокатора у исследуемых видов животных различен. В СП узле кролика заключительная часть МДД не изменялась, но за счет смещения E_{max} в сторону деполяризации существенно удлинялась фаза конечной реполяризации и незначительно снижалась спонтанная деполяризация. В СП узле мыши МДД существенно растягивалась в последней трети, а фаза конечной реполяризации не изменялась. Если эти изменения вызваны блоком HCN-каналов, тогда можно предположить, что свойства тока, активируемого гиперполяризацией (I_f), у этих видов животных различны и генерирование фазы МДД имеет свою специфичность.

Заключение

Лидокаин дозозависимо снижал максимальную скорость нарастания потенциалов действия в фазу 0 (dV/dt_{max}) у клеток синусно-предсердной области сердца кролика и мыши.

При сопоставимых dV/dt_{max} у обоих видов животных пейсмекерные клетки синусно-предсердного узла мыши демонстрировали более высокую чувствительность (в 10 раз) к блокатору Na^+ -каналов лидокаину, чем клетки синусно-предсердного узла кролика.

Остановка спонтанной активности у пейсмекерных клеток кролика и мыши в присутствии лидокаина свидетельствует о том, что наравне с Ca^{2+} -каналами Na^+ -каналы играют важную роль в формировании фазы быстрой деполяризации клеток синусно-предсердной области.

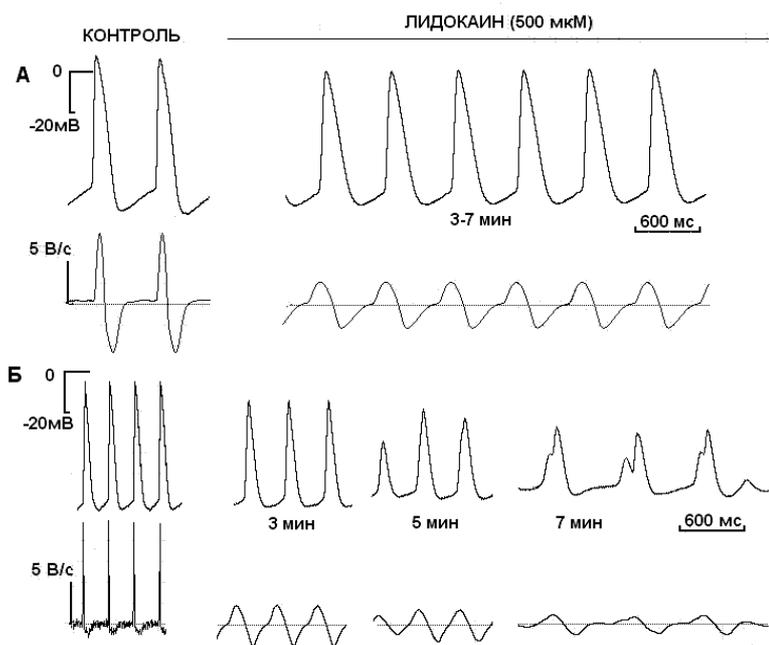


Рис. 3. Изменения конфигурации ПД и первой производной (dV/dt_{max}) кролика (А) и мыши (Б) при действии лидокаина (500 мкМ).

Литература

1. *Baruscotti M., Robinson R.B.* Electrophysiology and pacemaker function of the developing sinoatrial node // *J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2007. Vol. 293. P. H2613–H2623.
2. *Boyett M.R., Honjo H., Kodama I.* The sinoatrial node, a heterogeneous pacemaker structure // *Cardiovasc. Res.* 2000. Vol. 47. P. 658–687.
3. *Lei M., Jones S.A., Liu T. et al.* Requirement of neuronal- and cardiac-type sodium channels for murine sinoatrial node pacemaking // *J. Physiol.* 2004. Vol. 559. P. 835–848.
4. *Tellez J.O., Dobrzynski H., Greener I.D. et al.* Differential expression of ion channel transcripts in atrial muscle and sinoatrial node in rabbit // *Circ. Res.* 2006. Vol. 99. P. 1384–1393.
5. *Butters T.D., Aslanidi O.V., Inada S. et al.* Mechanistic links between Na⁺ channel (SCN5A) mutations and impaired cardiac pacemaking in sick sinus syndrome // *Circ. Res.* 2010. Vol. 107. P. 126–137.
6. *Létienne R., Vié B., Le Grandet B.* Pharmacological characterisation of sodium channels in sinoatrial node pacemaking in the rat heart // *Eur. J. Pharmacol.* 2006. Vol. 530. P. 243–249.
7. *Rocchetti M., Armato A., Cavalieri B. et al.* Lidocaine inhibition of the hyperpolarization-activated current (I_f) in sinoatrial myocytes // *J. Cardiovas. Pharmacol.* 1999. Vol. 34. P. 434–439.
8. *Lebedeva E.A., Golovko V.A.* An analysis of lidocaine and hyposodium solution effects on generation of pacemaker action potential in mouse sinoatrial node // *Proc. XXX Ann. Meeting ISHR. Medimond. Bolonga.* 2011. №628. P. 31-34.
9. *Gold M.S., Reichling D.B., Hampl K.F. et al.* Lidocaine toxicity in primary afferent neurons from the rat // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 1998. Vol. 285. P. 413–421.
10. *Scholz A.* Mechanisms of (local) anaesthetics on voltage-gated sodium and other ion channels // *Br. J. Anaesth.* 2002. Vol. 89. P. 52–61.

Статья поступила в редакцию 11.10.2012.

УДК 551.79/.8(470.1)

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ КВАРТЕРА НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ

Л.Н. АНДРЕИЧЕВА

*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
andreicheva@geo.komisc.ru*

С целью стратиграфического и генетического расчленения отложений квартера на юге Архангельской и севере Вологодской областей в пяти скважинах проведено их литологическое и палинологическое изучение. Это позволило выявить обстановки осадконакопления и определить минералого-петрографические особенности. Полученные данные дали возможность обосновать наличие в разрезе неоплейстоцена четырех горизонтов тиллов и связать их формирование с питающими ледниковыми провинциями. Установлено присутствие на этой территории осташковского тилла. На основе литологических показателей и палинологических спектров проведена корреляция разрезов скважин.

Ключевые слова: стратиграфия, корреляция, литология, палинология, неоплейстоцен, тилл, межледниковье

L.N.ANDREICHEVA. GEOLOGICAL STRUCTURE AND CONDITIONS OF QUATERNARY DEPOSITS IN NORTHWEST RUSSIA

For the stratigraphic and genetic separation of the Quaternary deposits in the south of Arkhangelsk and in the north of Vologda regions lithological and palynological composition of sediments found in five boreholes was studied. As a result the depositional environment and mineralogical and petrographic features of Quaternary deposits were revealed. The data made it possible to prove the availability of four till horizons in the Neopleistocene section and also the glacial provinces associated with them. The presence of Ostashkov till at this territory was established. On the basis of the lithological parameters and palynological spectra, correlation of boreholes sections was conducted.

Key words: stratigraphy, correlation, lithology, palynology, Neopleistocene, till, interglacial

Наиболее важными проблемами стратиграфии и палеогеографии четвертичной геологии северных районов Восточно-Европейской платформы являются диагностика разновозрастных горизонтов тилла в неоплейстоцене, установление генезиса и возраста межледниковых осадков и обоснованность корреляции ледниковых горизонтов. Для решения этих вопросов в смежных с Тимано-Печоро-Вычегодским регионом – Архангельской и Вологодской областях – было проведено комплексное исследование отложений квартера в скважинах. Отложения детально охарактеризованы литологически: проведен гранулометрический анализ мелкозема, исследован состав тяжелых минералов, определен петрографический состав обломков галечной и гравийной размерности в тиллах, а также песчаной – в шлифах. Межморенные осадки, кроме того, исследованы палинологическим методом, что позволило более или менее достоверно установить время их накопления и условия седиментации. Отложения неоплейстоцена изучены в пяти скважинах: на юге

Архангельской области в скв. 21, пробуренной на водоразделе рек Пинеги и Илеши – правобережье р. Северной Двины, и в трех скважинах в бассейне р. Устья: 12А/1, 17А/1 и 17А/3. На севере Вологодской области комплексно исследованы четвертичные отложения в скв. 114. Все скважины, за исключением скв. 21, расположены на левобережье Северной Двины (рис. 1). Мощность вскрытых отложений достигает 190 м.

Результаты исследований

В скважинах Архангельской области выделяют четыре разновозрастных горизонта тиллов, переслаивающихся с межморенными, преимущественно субаквальными песками, алевритами и глинами.

В разрезе скв. 21 вскрыты четыре толщи тиллов, слагающие интервалы глубин 164,5–151,6 м, 148–130,5 м, 113,3–89,5 м и 81,5–48,4 м. Между тиллами лежат пески, алевриты, алевритистые глины озерного и озерно-болотного генезиса, насыщенные спорами и пылью.

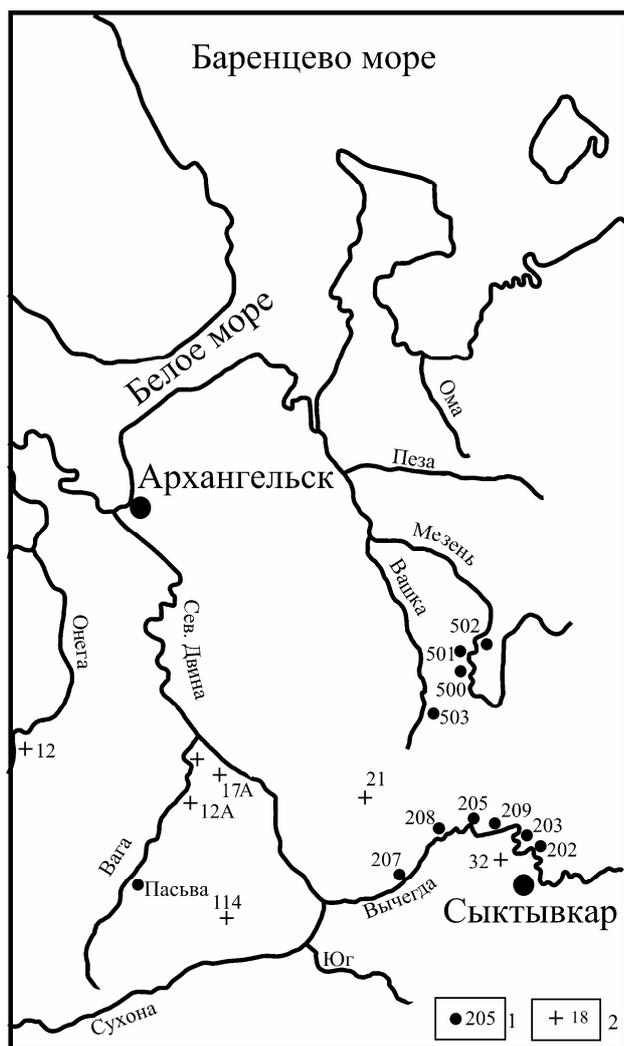


Рис. 1. Схема расположения обнажений и скважин. 1 – обнажения, 2 – скважины.

Наиболее древний тилл, представленный типичным валунным суглинком – серым неслоистым, очень слабо сортированным ($S_c=0,09$) с d_{cp} , равным 0,017 мм, слагает интервал 164,5–151,6 м. Содержание материала, растворимого в 10%-ной соляной кислоте и определяющей степень суммарной карбонатности породы, высока – 8,9%. Состав тяжелых минералов мелкопесчаной фракции определяется гранат (13,8%)-амфибол (24,5%)-эпидотовой (26%) минеральной ассоциацией (рис. 2). Грубообломочный материал состоит главным образом из осадочных пород с незначительной примесью практически неокатанных обломков кристаллических пород.

Тилл перекрыт пачкой глинисто-алевритовых отложений озерного генезиса, по палинологическим данным предположительно лихвинского возраста [4], из чего следует, что формирование тилла происходило, вероятно, в раннем неоплейстоцене в окское время (Q_1^{ok}).

Второй снизу тилл в этой скважине выступает в интервале глубин 148–130,5 м. Сложен он серым валунным суглинком со средним диаметром (d_{cp}), составляющим 0,019 мм, и с очень низкой степенью

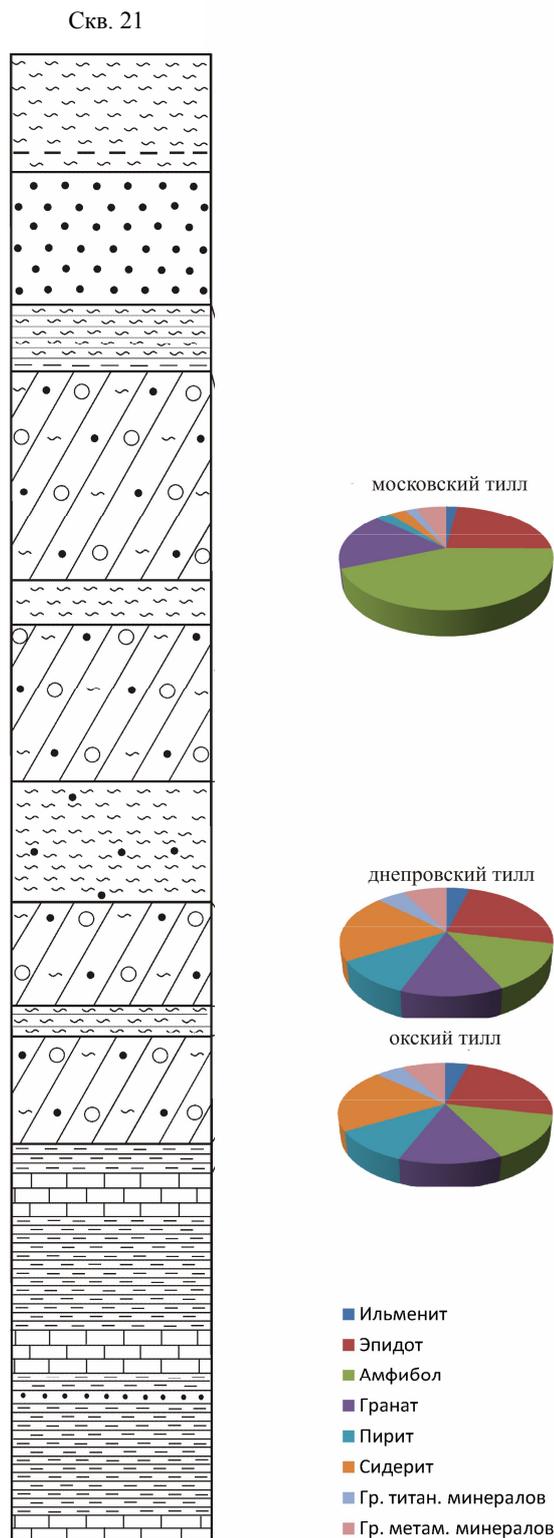


Рис. 2. Минеральный состав тяжелой фракции тиллов в скв. 21. (Условные обозначения к рис. 2–5 см. на стр. 68).

сортированности мелкозема (S_c), равной 0,08. Суммарная карбонатность тилла довольно значительна – 7,7%. Тяжелая фракция представлена пирит (10%)-гранат (12,5%)-амфибол (13,5%)-сидерит (19,5%)-эпидотовой (23%) ассоциацией минералов

(рис. 2). Суммарное количество пирита и сидерита достигает 30%. Несколько повышено (до 7,5%) содержание минералов группы титановых. Отложения не содержат обломков кристаллических пород. Вещественный состав этого тилла отражает связь его с Северо-Восточной терригенно-минералогической провинцией.

На тилле лежит пачка озерных глин – серых оскольчатых, с редкой галькой (интервал глубин 130,5–113,3 м), характер палинологических спектров и смена климатических фаз в которых, по мнению Л.А. Коноваленко [4], присущи шкловскому межледниковью на европейском Северо-Востоке России.

Залегающий выше горизонт тилла слагает интервал глубин 113,3–89,5 м. По гранулометрическому составу почти не отличается от лежащих ниже окского и днепровского тиллов. В нем также довольно высоко содержание материала, растворимого в 10%-ной HCl, – 7,8%. Тилл имеет средний диаметр, равный 0,022 мм, и характеризуется очень низкой степенью сортированности мелкозема ($S_c=0,11$). Тяжелая фракция этого тилла определяется гранат (16,7%)–эпидот (22,3%)–амфиболовой (42,8%) минеральной ассоциацией. Резко понижено (до 4,6%) суммарное количество пирита и сидерита. Основу петрографического спектра здесь составляют кристаллические породы – разнообразные граниты, гнейсы, встречаются гранатовые амфиболиты.

При сопоставлении результатов вещественного состава двух горизонтов тиллов в этой скважине (из интервала глубин 148–130,5 м и 113,3–89,5 м) выявлены существенные различия, сводящиеся, во-первых, к повышенной концентрации в нижнем тилле пирита и сидерита, суммарное содержание которых достигает 30%, а в выше лежащем тилле оно почти на порядок ниже (4,6%), тогда как гранаты и амфиболы составляют здесь в сумме до 60%, а в нижнем – лишь 26%. Второе отличие состоит в том, что в нижнем тилле отсутствуют обломки кристаллических пород, а в залегающем выше тилле они – основа петрографического спектра. Положение нижнего тилла в разрезе между предположительно лихвинскими и шкловскими осадками подтверждает его формирование в днепровское время ($Q_{II}^2 dn$). Отмеченные особенности позволяют уверенно сопоставлять днепровский тилл с печорским Тимано-Печоро-Вычегодского региона, на территории которого формирование этого тилла мы связываем с Пайхой-Новоземельским центром оледенения. Возможность литологической корреляции тилла, залегающего выше, с вычегодским тиллом бассейна северо-западных районов Печорской низменности позволяет заключить, что образовался он за счет терригенного материала из Фенноскандинавской области питания [1–3] в московское время ($Q_{II}^4 ms$).

Московский тилл перекрыт 8-метровой пачкой (интервал 89,5–81,5 м) коричневых неслоистых, слабо сортированных ($S_c=0,25–0,26$) глин почти без включений грубообломочного материала и очень тонких по гранулометрическому составу – $d_{cp}=0,004$ мм. По заключению Л.А. Коноваленко,

проводившей их палинологическое изучение [4], во время формирования этих глин холодный климат на территории исследований препятствовал распространению лесных сообществ, что определило межстадиальный характер спорово-пыльцевых спектров.

В интервале глубин 81,5–48,4 м вскрывается еще одна толща тилла, который представлен красновато-коричневыми валунными глинами, иногда переходящими в суглинки. Отложения практически не сортированы ($S_c=0,13$), имеют высокую суммарную карбонатность – 9,1% и тонкий гранулометрический состав – $d_{cp}=0,016$ мм. Для этого тилла характерна эпидот (12,6%)–гранат (16,8%)–амфиболовая (50,8%) ассоциация тяжелых минералов. Петрографический спектр обломков представлен преимущественно кристаллическими породами. Весьма сходный комплекс литологических характеристик этого тилла и московского в интервале глубин 113,3–89,5 м, а также залегание красновато-коричневых валунных глин на коричневых межстадиальных глинах дают основание предположить, что время формирования этой толщи тилла можно связать с заключительной стадией московского оледенения.

Тилл перекрыт глинами ($d_{cp}=0,006$ мм) средней степени сортированности ($S_c=0,38$), сформировавшимися, вероятно, в условиях озерного бассейна (интервал глубин 48,4–38,5 м). По мнению палиолога Л.А. Коноваленко, накопление их происходило, вероятнее всего, в микулинское межледниковье [4].

На глинах лежит полигенетическая толща отложений мощностью более 38 м. Нижние 20 м этой толщи (интервал 38,7–17 м) сложены хорошо сортированными ($S_c=0,36–0,59$) мелко-среднезернистыми песками аллювиального генезиса. Залегающие выше глины и суглинки (мощность 17 м) сортированы в различной степени ($S_c=0,14–0,36$) и сформировались они, вероятнее всего, в условиях обширного подпрудного водоема. Наличие такого бассейна в позднем неоплейстоцене не противоречит давно известному представлению исследователей [7] о положении краевой зоны максимальной стадии поздневалдайского оледенения на левобережье Северной Двины, т.е. к западу от скв. 21. Провести более детальное стратиграфо-генетическое расчленение этой толщи на основе имеющихся данных не представляется возможным.

В скв. 12А/1 мощность отложений квартала составляет около 70 м. В верхних 10 м вскрывается тилл, представленный серым и коричнево-серым валунным суглинком с обломками известняков, кремней, метаморфических пород, дресвой мергелей. Тилл лежит на 30-метровой толще разнозернистых песков, которые, в свою очередь, залегают на глинистых отложениях мощностью 24 м. О генезисе осадков судить проблематично, вероятно, образование их происходило в субквальной обстановке. Глинистая толща в интервале глубин 64,5–40,6 м изучена Т.И. Марченко палинологически и, по ее мнению, сформировались отложения в среднем неоплейстоцене в шкловское время [5]. Соответственно, время накопления тилла можно связывать с московским ледниковьем.

В скв. 17А/1 нижний тилл в интервале глубин 69,8–61,5 м представлен темно-серым с коричневым оттенком валунным суглинком с включениями гравийно-галечного материала, преимущественно светлоокрашенного. Результаты гранулометрического состава свидетельствуют о довольно слабой степени его сортированности ($S_c=0,24$), d_{cp} составляет 0,021 мм. Тяжелая фракция сложена ильменитом (12,4%)–эпидотом (14,6%)–амфиболом (16,3%)–пиритом (20,4%)–гранатов (24,18%) минеральной ассоциацией (рис. 3). Повышенные содержания граната здесь связаны, вероятно, с высокой его концентрацией

ются турмалин, циркон, ставролит, рутил, ортопироксен, эгирин, глаукоцит. Аутигенные минералы представлены кальцитом, доломитом, агрегатными выделениями пирита.

На этом тилле в интервале 61,5–57,2 м лежит пачка переслаивания глины алевролитистой и алевролита глинистого коричневой окраски со слоистостью горизонтальной и волнистой, вероятно, озерного генезиса. Отложения характеризуются средней степенью сортированности мелкозема (0,31) с d_{cp} , равным 0,025 мм. Мелкопесчаная фракция сложена амфиболом (14,2%)–эпидотом (15%)–гранатом (20,9%)–ильменитовой (25,7%) ассоциацией тяжелых минералов.

Средний горизонт тилла в этой скважине вскрыт в интервале глубин 57,2–38,5 м и представлен темно-серой слабо сортированной супесью ($S_c=0,21$) более грубой по составу, чем нижний тилл: средний диаметр составляет 0,045 мм. Для этого тилла характерна пирит (11,1%)–эпидот (12,6%)–амфибол (16,3%)–ильменит (17,5%)–гранатовая (24,8%) минеральная ассоциация. Высокие содержания ильменита, возможно, связаны с переотложением его из подстилающих озерных осадков, где он составляет до 29%. Под микроскопом среди обломков преобладающим развитием пользуются лейкократовые сростки кварца и полевого шпата из гранитов и гнейсов и единичные обломки метадиабазов.

Над тиллом на глубине 38,5–29,25 м лежит смесь песков разнозернистых неслоистых неясного генезиса с множеством обломков светлоокрашенных карбонатных пород. Пески перекрыты еще одной толщей тилла (до глубины 2,5 м), представленного серовато-коричневыми валунными суглинками и супесями. Степень сортированности отложений низкая – $S_c=0,17$, тилл имеет еще более грубый гранулометрический состав, чем лежащие ниже тиллы, – $d_{cp}=0,068$ мм. Ассоциация тяжелых минералов представлена ильменитом (15,3%), эпидотом (17,1%), гранатом (22%) и амфиболом (31,2%).

Таким образом, в скв. 17А/1 все три горизонта тиллов имеют незначительные различия в литологическом составе, а комплекс обломков пород, диагностированных под микроскопом, в них одинаков, что может указывать на единый источник сноса терригенного материала при формировании тиллов – Фенноскандинавскую питающую провинцию. Основываясь на существующих в настоящее время представлениях о пределах распространения ледниковых покровов в позднем неоплейстоцене [8, 9], можно сделать вывод о накоплении верхнего тилла в позднем валдае, во время осташковского ледникова.

В скв. 17А/3 нижняя толща тилла выступает на глубине 40,3–31,3 м, сложена она пестроокрашенным суглинком зеленовато-серых, грязно-серых и коричневых тонов. Гранулометрический состав тилла аналогичен таковому в скв. 17А/1: отложения слабо сортированы $S_c=0,21$, $d_{cp}=0,023$ мм. Доминирующими минералами в тяжелой фракции тилла являются гранат (26,1%), амфибол (24,5%), эпидот (17,3%), ильменит (16,2%), на долю пирита приходится лишь 4,7% (рис. 4). В нижней части тол-

Скв. 17 А/1

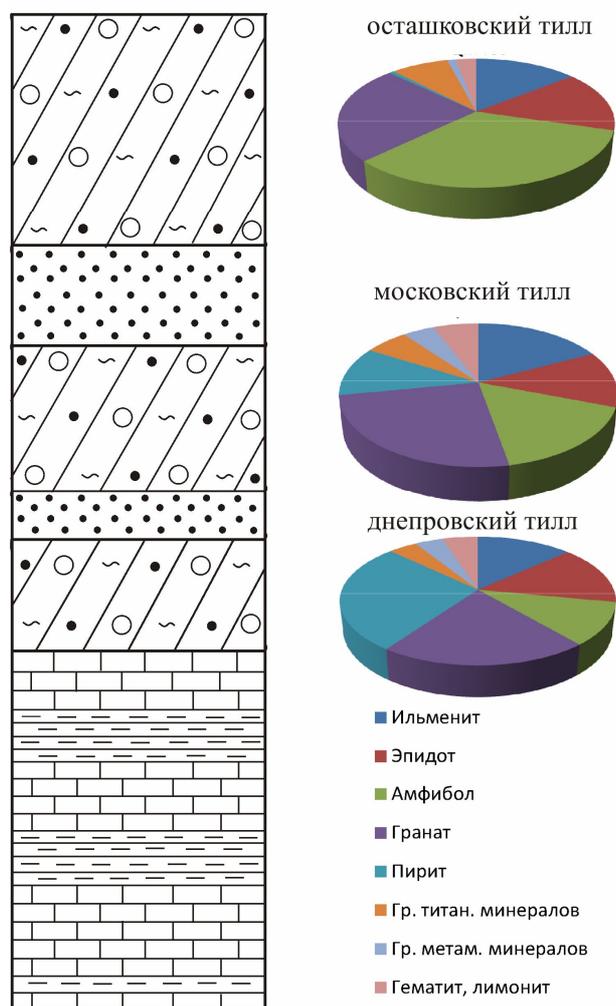


Рис. 3. Минеральный состав тяжелой фракции тиллов в скв. 17А/1.

щей (до 64%) в отложениях мезозоя, непосредственно подстилающих толщу тилла. В шлифах встречаются единичные обломки магматических и метаморфических пород, в том числе хлоритизированные эффузивы основного состава, эпидозит с реликтами плагиоклаза, филлиты, серпентинит и лейкократовые сростки полевого шпата и кварца, вероятно, из гранитоидов. Из аксессуарных минералов, кроме отмеченных выше, постоянно отмеча-

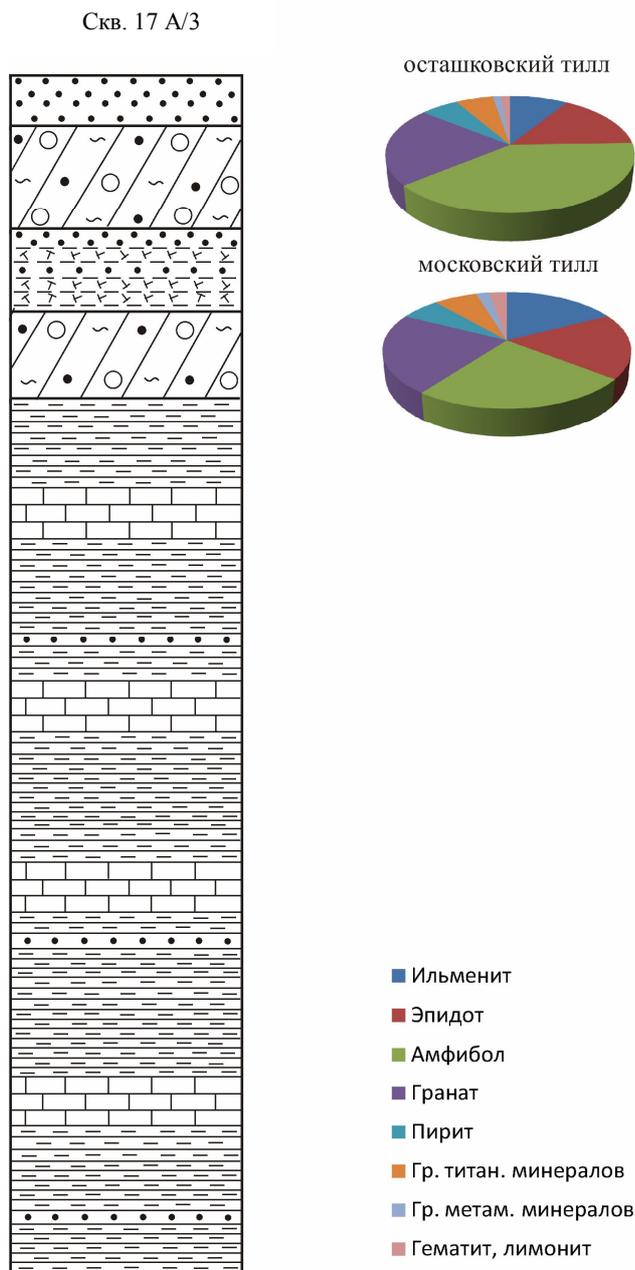


Рис. 4. Минеральный состав тяжелой фракции тиллов в скв. 17А/3.

щи количество пирита составляет 17,4%, здесь он образует скопления зерен агрегатного строения размером до 0,22 мм. Обогащение амфиболом, гранатом и пиритом происходило, вероятно, за счет ассимиляции этих минералов из подстилающих отложений, где концентрация амфибола достигает 32%, граната – 33%, а пирита – 52%. Под микроскопом наблюдаются обломки магматических и метаморфических пород, включая лейкократовые части амфиболитов, сростки кварца и полевого шпата из обломков гранитоидов. Отмечаются пластины слюд, зерна глауконита и хлорита, гелифицированный детрит растительного происхождения. Аутигенные минералы представлены преимущественно кальцитом, в незначительном количестве доломитом, ок-

сидами и гидроксидами железа, смектитсодержащими смешанослойными образованиями.

Тилл перекрыт 11-метровой пачкой озерных и озерно-болотных отложений (интервал глубин 31,3–20 м), палинологическое изучение которых свидетельствует о накоплении их в среднем неоплейстоцене предположительно в шкловское ($Q_{II}^3 shl$) время [5]. Результаты минерального состава тяжелой фракции нижнего горизонта тилла в скважинах 17А/1 и 17А/3 в комплексе с петрографическим составом обломков пород, представленным обломками эффузивов кислого состава, мономинеральных и слюдосодержащих кварцитов, лейкократовых сростков кварца и полевого шпата из гранитов и гранитоидов, единичных базальтоидов, дают основание связать его формирование в обеих скважинах с Фенноскандинавской питающей провинцией. И происходило это, скорее всего, в днепро-ское время, на что указывает геологическая позиция тилла под шкловскими осадками.

Верхний тилл (интервал глубин 20–6,5 м) здесь представлен практически не сортированной ($S_c=0,12$) супесью с $d_{cp}=0,048$ мм. Тилл имеет пеструю окраску: на зеленовато-сером фоне выделяются светло-серые кремнистые и белые обломки карбонатных пород размером до 8 мм. Состав обломков пород аналогичен таковому в нижнем горизонте тилла. Тяжелая фракция его сложена эпидот (15,4%)–гранат (21,6%) амфиболовой (39,3%) минеральной ассоциацией с довольно высоким содержанием ильменита – 8,9%. Суммарное содержание граната и амфибола в ряде проб достигает 65%, что может указывать на связь этого горизонта тилла с Фенноскандинавской питающей провинцией. По положению тилла в разрезе (согласно залеганию на шкловских озерных и озерно-болотных осадках) время его формирования приходится на московское ледниковье ($Q_{II}^4 ms$).

В основании разреза **скв. 114** на глубине 71–32 м вскрыты песчано-супесчано-алевритовые осадки с растительным детритом в виде мелких линз и точечных включений. Отложения характеризуются различной степенью сортированности материала: от практически несортированных ($S_c=0,21-0,22$) до довольно хорошо сортированных ($S_c=0,55-0,59$). Толща определяется низким выходом тяжелой фракции, которая сложена эпидот (17,6%)–гранат (20,3%)–амфиболовой (26,4%) минеральной ассоциацией и довольно высокой (6,1–9,4%) концентрацией минералов метаморфической группы (кианита, ставролита, силлиманита). По результатам палинологического анализа накопление этих отложений произошло, вероятно, в шкловское ($Q_{II}^3 shl$) время [5].

В интервале 35,6–32 м между шкловскими отложениями и тиллом лежат глины и алевриты, сформированные, вероятно, в условиях приледникового водоема и образующие парагенез с тиллом.

Нижний горизонт тилла, залегающий на глубине 32–24,2 м, представлен слабо сортированным ($S_c=0,13-0,20$) валунным суглинком, а в основании толщи – глиной с гравием и галькой. Средний диаметр варьирует от 0,007 до 0,029 мм. Суммарная

карбонатность очень существенна и составляет в среднем 14,1%, в отдельных случаях достигает 17%. Тяжелая фракция тилла, выход которой достаточно высок (1,14-1,32%), определяется эпидот (12,6%)–гранат (22,4%)–амфиболовой (38,4%) ассоциацией минералов (рис. 5) с содержаниями амфи-

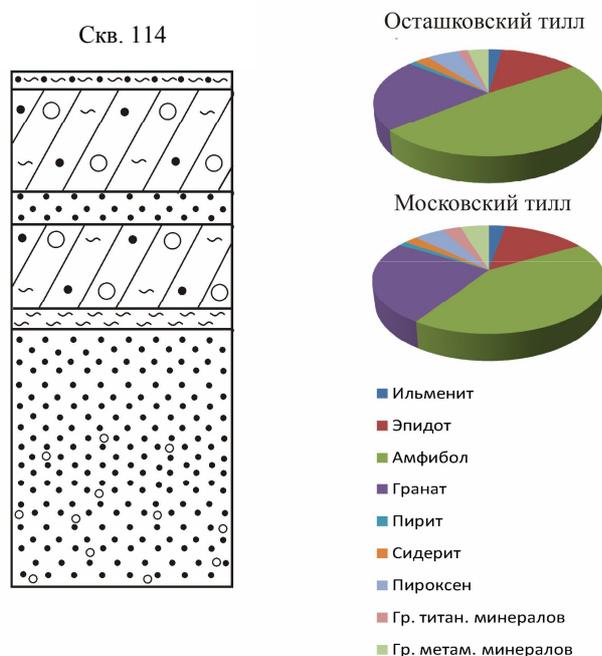


Рис. 5. Минеральный состав тяжелой фракции тиллов в скв. 114.

болов в отдельных образцах до 46% и гранатов до 30%. Характерны довольно низкие концентрации эпидота (11–13%) и очень незначительное суммарное количество пирита и сидерита (1,8–5,4%). В петрографическом составе крупнообломочного материала преобладают известняки светлой окраски (до 50%). В шлифах наблюдаются обломки осадочных пород, а также гранитов, андезитов, измененных эффузивных пород. Кварц, часто с включениями биотита и в сростках с амфиболами, составляет 33%, что, скорее всего, следует связывать с разрушением обломков гранитов и гранитогнейсов. Выявленные минералогические и петрографические особенности его, вероятно, указывают на формирование тилла за счет терригенного материала Фенноскандинавской области питания [1]. Его геологическая позиция – залегание на отложениях шкловского горизонта – свидетельствует о московском времени формирования тилла. По литологическим признакам эта толща тилла хорошо коррелируется с вычегодской мореной нижней Вычегоды [3], а также с московским тиллом Юго-Западного Притиманья [4] и центра Русской равнины [6].

На тилле (глубина 24,2–17 м) лежит толща песков, вероятно, водного генезиса, имеющих среднюю степень сортировки материала ($S_c=0,32-0,52$). Выход тяжелой фракции стабильно высок: 1,33–

1,66%, состав ее определяется почти равными соотношениями амфиболов и гранатов, составляющими в сумме до 71,5%. Отложения условно отнесены к микულიнскому горизонту [5].

Выше в интервале глубин 17–3 м вскрыт второй тилл, представленный несортированными валунными суглинками ($S_c=0,14$) с $d_{cp}=0,024$ мм. Выход тяжелой фракции в этом тилле также довольно высок (1,02–1,61%). В тяжелой фракции доминируют, как и в нижнем тилле, эпидот – 12,7%, гранат – 20,9% и амфибол – 46,3%. Микроскопическая характеристика этого тилла также идентична таковой нижнего тилла. Отличия состоят лишь в еще более высоком содержании здесь обломков карбонатных пород при преобладании (до 47%) светлоокрашенных их разновидностей, и более крупном их размере, то же относится к обломкам других пород. Эта особенность отложений отмечается, собственно, и при анализе данных гранулометрического состава: содержание гравийной фракции (>1 мм) достигает здесь 8,6%. По литологическим особенностям формирование этой толщи тилла тоже можно связать с Фенноскандинавской питающей провинцией и предположить, что толща этого (верхнего) тилла накапливалась в позднем валдае, во время осташковского ледниковья [8, 9].

Заключение

В результате комплексного изучения отложенный квартера в скважинах северо-запада европейской России выделены четыре горизонта тиллов с вполне определенным комплексом литологических показателей: петрографическим составом обломков пород и ассоциациями тяжелых минералов, характерных для разновозрастных горизонтов тиллов и сформированных за счет терригенного материала питающих ледниковых провинций. Установлено наличие верхнеледниковых (осташковского) тилла в скважинах, расположенных на левобережье Северной Двины. На основе изучения литологических особенностей отложений и палинологических спектров межледниковых осадков проведена корреляция четвертичных отложений в изученных скважинах (рис. 6).

Исходя из геологической позиции в разрезе самого нижнего тилла – залегания под ливинскими озерными отложениями, образовался тилл, по всей вероятности, в окское время. Для выявления местоположения питающей ледниковой провинции во время формирования этого тилла имеющихся литологических данных недостаточно.

Формирование днепровского тилла на правобережье Северной Двины связано с Северо-Восточной терригенно-минералогической провинцией. На левобережье реки петрографо-минералогические особенности днепровского тилла указывают на то, что поставщиком терригенного материала в днепровское время была Фенноскандинавская питающая провинция.

Образование московского и осташковского тиллов на всей изученной территории Архангельской и Вологодской областей связано с Фенноскандией.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 12-У-5-1016 «Верхний плейстоцен на Европейском севере России: палеогеография, седиментогенез, стратиграфия».

Литература

1. *Андреичева Л.Н.* Питающие провинции и их влияние на формирование состава морен Тимано-Печоро-Вычегодского региона // *Литология и полезные ископаемые*. 1994. №1. С. 127–131.
2. *Андреичева Л.Н.* Плейстоцен европейского Северо-Востока. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 323 с.
3. *Андреичева Л.Н., Гуслицер Б.И., Коноваленко Л.А. и др.* Средневерхнеплейстоценовые отложения нижней Вычегды // *Стратиграфия и палеогеография фанерозоя Европейского Северо-Востока СССР: Труды X Геологической конференции Коми АССР*. Сыктывкар, 1987. С. 150–155.
4. *Андреичева Л.Н., Коноваленко Л.А.* Строение и условия формирования плейстоценовых отложений в Юго-Западном Приитиманье // *Биостратиграфия фанерозоя Тимано-Печорской провинции*. Сыктывкар, 1989. С. 75–83.
5. *Андреичева Л.Н., Марченко-Ваганова Т.И.* Развитие природной среды и климата в антропогене на северо-западе России. Сыктывкар: Геопринт, 2004. 42 с.
6. *Андреичева Л.Н., Немцова Г.М., Судакова Н.Г.* Среднеплейстоценовые морены севера и центра Русской равнины. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 83 с.
7. *Арсланов Х.А., Левина И.Б., Останин В.Е. и др.* О геохронологии и стратиграфии позднего плейстоцена и раннего голоцена бассейна р. Северной Двины // *Вестник Ленинградского ун-та*. 1984. № 12. С. 57–66.
8. *Государственная геологическая карта Российской Федерации*. Лист Р-38, 39. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 265 с.
9. *Проблемы стратиграфии четвертичных отложений и краевые ледниковые образования Вологодского региона (северо-запад России): Материалы Международного симпозиума, г. Кириллов, июнь 2000 г.* М.: ГЕОС, 2000. 99 с.

Статья поступила в редакцию 11.01.2012.

УДК 550.831

СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

О.М. ВЕЛЬТИСТОВА, Е.Н. МОТРИЮК

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта
kmotryuk@yandex.ru

В статье дан анализ современных подходов к интерпретации гравимагнитных данных. Приведены характеристики популярных отечественных программных продуктов. КОСКАД 3D, СИГМА 3D, VECTOR и GCIS применяются для решения задач обработки (преобразований потенциальных полей, таких как фильтрация, трансформация, и т.д.), решения прямых и обратных задач. Рассматриваются особенности разработанных в УГТУ нового программного комплекса GeoVIP и модуля EvDynInversion, обеспечивающих построение адекватных моделей сложнопостроенных сред в условиях недостатка геолого-геофизической информации на основе критериального и эволюционно-динамического принципов решения обратных задач.

Ключевые слова: гравитационные и магнитные данные, обратные задачи, критерии оптимальности, программные продукты, технологии

O.M.VELTISTOVA, E.N.MOTRYUK. MODERN DOMESTIC SOFTWARE FOR GRAVIMAGNETIC DATA INTERPRETATION

The paper deals with the analysis of modern approaches to gravimagnetic data interpretation. It also gives specifications of several most popular domestic software products. КОСКАД 3D, СИГМА 3D, VECTOR и GCIS are applied to solve processing tasks (potential fields modifying, such as filtering, transformation etc.) as well as direct and inverse problems. Characteristic features of a new bundled software GeoVIP and the module EvDynInversion developed at Ukhta State Technical University and providing creation of adequate models of complex media at the lack of geological and geophysical information on the basis of criterial and evolutionary-dynamic principles of inverse problems solution are considered.

Key words: Interpretation of gravity and magnetic data, processing tasks, inverse problems, optimality criteria, software products, technologies

Целью интерпретации геолого-геофизических данных является извлечение полезной информации из имеющихся геолого-геофизических данных, главным образом, для построения геологических моделей сред изучаемых районов при проведении прогноза нефтегазоносности. Необходимость увеличения запасов нефти и газа и повышения эффективности работ, связанных с разработкой месторождений полезных ископаемых, требует формирования надежных моделей эффективных параметров. Развитие компьютерной техники позволяет создавать программные продукты, оперирующие с большим объемом информации и решающие сложные задачи с минимальной затратой времени.

В статье приводится краткий анализ методов и наиболее распространенных отечественных компьютерных технологий интерпретации гравимагнитных данных. В ранее опубликованных материалах не проводилось совместное описание методик и технологий обработки и геологического истолкования потенциальных полей. Отдельно рассматривались различные способы обработки, методы решения обратных задач и подходы, основанные на использовании определенного математического аппарата.

Критический анализ традиционных методов решения обратных задач гравиметрии дан в статье А.И. Кобрунова [1], где выделяются два подхода: один основан на решении обратных задач в рамках призматических конструкций, другой – на пересчете трансформаций поля в единицы плотности. Отмечены проблемы, возникающие при применении их на сложных средах. В первом случае возникают эффекты скрытой эквивалентности, во втором – полученные модели не обеспечивают учет реальной информации и не соответствуют наблюдаемому гравитационному полю с заданной точностью. Предлагается применение критериальных и эволюционно-динамических принципов при решении обратной задачи, которые позволяют максимально использовать априорную информацию об изучаемом объекте и повысить достоверность построений.

Одним из важнейших составляющих элементов в методах интерпретации является аппарат теории вероятностей и математической статистики. Обзор статистических методов комплексной интерпретации геолого-геофизической информации приведен в работе А.А. Никитина [2], где автор отмечает ведущую роль статистических методов при определении геологической природы объектов по ком-

плексу геофизических данных (фильтрация геополей, методы распознавания образов и др.) и при оценке количественных параметров объекта. Особое внимание уделяется комплексной интерпретации, которая позволяет уменьшить неоднозначность и повысить достоверность построений и реализуется путем объединения решений обратных задач каждого метода с использованием корреляционных зависимостей между физическими характеристиками изучаемой среды и согласования геометрии контактных поверхностей (В.Н. Глазнев). Соответствие полученных моделей реальной среде можно оценить функцией, в которой участвуют элементы корреляционной матрицы отклонения модельного и наблюдаемого полей. Имеющиеся методы столкновения геолого-геофизических данных предназначены для решения широкого круга задач.

Основные задачи, решаемые при интерпретации гравиметрических данных

Традиционное разделение интерпретации на качественную и количественную позволяет выделить два направления.

Первое направление включает в себя анализ различных видов преобразования поля. К данному направлению относятся задачи, включающие фильтрацию, способы аналитического продолжения, метод особых точек (В.Н. Страхов, Г.Я. Голицдра, А.В. Цирульский, Г.М. Воскобойников, В.М. Березкин и др.), аналитические F- и S-аппроксимации полей (В.Н. Страхов, И.А. Керимов, И.Э. Степанова, А.С. Долгаль), анализ спектрального разложения полей, корреляционно-регрессионный и факторный анализы (К.В. Гладкий, Ф.М. Гольцман, В.И. Шрайбман, М.С. Жданов, О.В. Витвицкий, С.А. Серкерев, А.А. Никитин и др.), вейвлет-анализ (А.С. Долгаль, Э.В. Утемов, М.Б. Штоколенко, А.В. Пугин). Проведение таких работ позволяет проводить качественную интерпретацию, устанавливая особенности аномалии, оценивать глубину ее залегания.

Второе направление – это построение физико-геологических моделей сред, основанное на решении обратных задач с применением различных методов подбора (В.И. Старостенко, В.Н. Страхов, В.М. Новоселицкий, Е.Г. Булах и др.), методов аналитического решения (В.Н. Страхов, А.И. Кобрунов, Ю.И. Блох и др.), спектральном анализе в решении обратных задач (Л.Т. Бережная, М.А. Телепин, О.И. Журавлева и др.), использовании методов регуляризации для решения неустойчивых обратных задач (В.И. Старостенко, С.М. Оганесян), теории вероятностей, математической статистики (В.Н. Глазнев, Ф.М. Гольцман, Т.Б. Калинина и др.), нейронных сетей и генетических алгоритмов (И.И. Приезжев) и других разделов прикладной математики. В зависимости от поставленных геологических задач, наличия априорной информации используются различные способы получения результатов и выполнения адекватных реальной среде построений.

Для прогнозирования залежей углеводородов наибольший интерес имеет второе направление, основанное на представлении объектов и полей как

функциональных метрических пространств. В данном типе задач строится содержательный класс единственности (модельный класс), учитывающий априорную информацию о возможном решении; выбирается критерий качества подбора наблюдаемого поля полей модели из заданного класса с последующей разработкой алгоритма оптимизации модели [6, 7]. *Модельный класс* – множество возможных элементарных тел m , аппроксимирующих геологическую среду. Для каждого m расчет гравитационного поля осуществляется при помощи оператора прямой задачи $A(m) = u$. *Критерий подбора наблюдаемого и рассчитанного полей* представлен минимизацией функционала $J(u_n, A(m))$, характеризующего степень согласия наблюдаемого u_n и рассчитанного гравитационного полей. Вид функционала определяется имеющимися предположениями о виде помех в исходном поле. Существуют различные способы представления критерия: интегральные квадратичные критерии оптимальности, корреляционные критерии оптимальности, равномерные критерии оптимальности и др. *Алгоритм решения обратной задачи* есть способ осуществления минимизации функционала $J(u_n, A(m))$, в результате чего определяется искомая плотностная модель m^* . В зависимости от того, как задано гравитационное поле и с какой точностью, а также от таких факторов, как наличие регионального фона, влияния пород, залегающих вне области поиска решения, и т.п., принимается различный вид функционала $J(u_n, A(m))$. Первые методы решения обратных задач (методы подбора) были основаны на аппроксимации среды набором тел правильной формы (призмы, уступы и т.д.). При использовании данного подхода возникают эффекты скрытой эквивалентности, когда полученное решение значительно отличается от исходной модели. Существуют методы решения обратных задач, позволяющие уменьшить возникновение этих эффектов, в частности, базирующиеся на критериальном и эволюционно-динамическом подходах.

Известно, что обратная задача в геофизике не может быть решена однозначно. Эта неоднозначность решения имеет две стороны. Одна из них касается качественного определения геологической природы геофизических аномалий, вторая – получения количественных характеристик геометрии объекта исследований: формы, размеров, глубины и других элементов залегания. Для сужения неоднозначности в настоящее время интерпретация гравиметрических материалов проводится на основе комплексного подхода к решению поставленных геологических задач с учетом использования априорной геолого-геофизической информации. Применение критериального подхода при решении системы обратных задач для разных методов носит название согласованно-критериального подхода [1, 7].

На современном этапе развивается эволюционно-динамический подход к решению обратных задач геофизики [1, 8]. В качестве составляющей

критерия оптимальности используются уравнения движения материи для распределенных параметров и системы поверхностей, управляемых геодинамическими параметрами (к числу которых относятся скорости дилатации, сдвиговых деформаций и другие). Разработанные принципы и выведенные уравнения позволяют включать в процесс решения обратной задачи априорную информацию о сценариях эволюции системы, ее возможном генезисе.

щейся фильтрации, обратных вероятностей и их многомерных аналогов позволяет успешно решать задачу обнаружения слабых сигналов на фоне соизмеримых по амплитуде помех (рис. 1). Математический аппарат, основанный на вейвлет-анализе, позволил использовать спектральные характеристики для разложения нестационарных полей, а применение процедур статистического зондирования потенциальных полей дает возможность опреде-

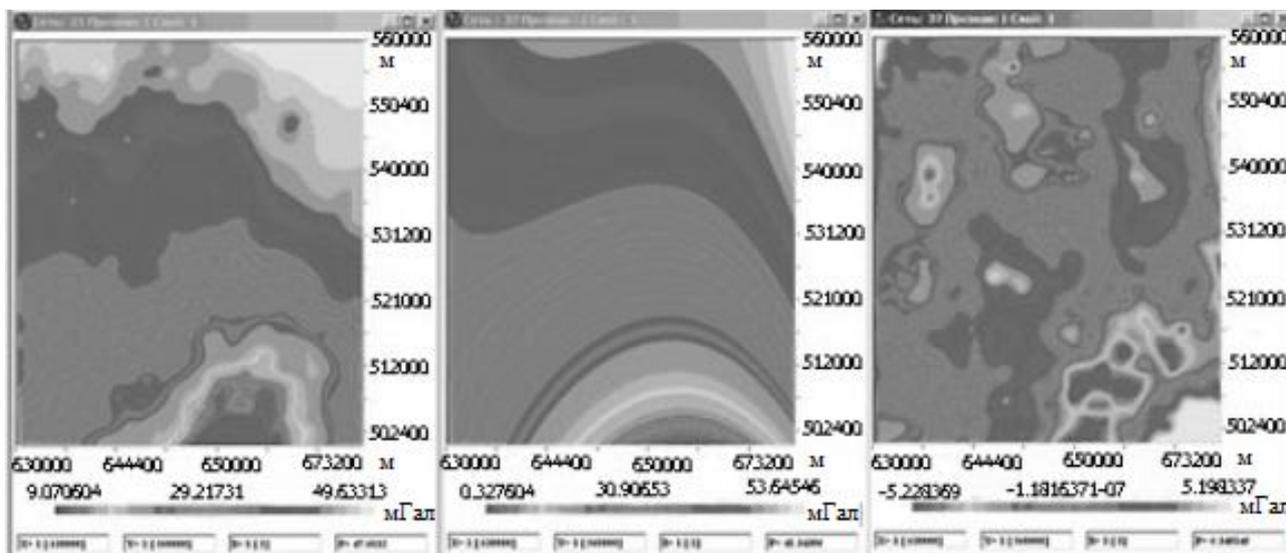


Рис. 1. Двумерная фильтрация в системе КОСКАД 3D: гравитационное поле, трендовая компонента, локальная компонента.

Наиболее распространенные отечественные программные продукты, предназначенные для интерпретации гравимагнитных данных

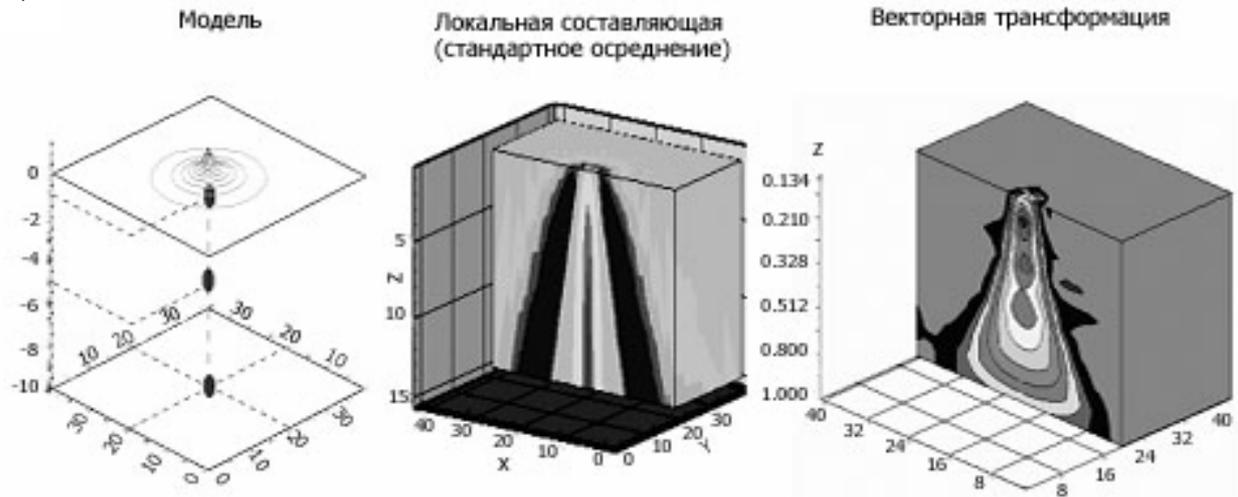
Рассмотрим методы, на которых основаны используемые геофизиками технологии интерпретации гравимагнитных данных и для решения каких задач они применяются. Обсудим возможные пути улучшения качества решения. Среди наиболее часто применяемых отечественных программных разработок можно выделить: КОСКАД 3D, СИГМА 3D, VECTOR, GCIS.

Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D (Авторы: А.А. Никитин, А.В. Петров, А.С. Алексашин, <http://www.coscad3d.ru/>). В основе функционального наполнения технологии лежат работы Г.А. Тархова, А.А. Никитина, В.И. Аронова, С.А. Серкерова, Д.А. Родионова, Г.В. Демуры и др., в которых впервые был обозначен спектр оригинальных геологических задач, решаемых с помощью вероятностно-статистических методов. В комплекс КОСКАД 3D входят программы обработки и интерпретации геолого-геофизической информации, базирующиеся на оценке и анализе статистических, градиентных и спектрально-корреляционных характеристиках геофизических полей, методах линейной оптимальной фильтрации, способах обнаружения слабых аномалий, алгоритмах классификации и распознавания [9]. Программная реализация методов межпрофильной корреляции, самонастраиваю-

щая глубину аномального объекта. Последней разработкой в этом программном комплексе является программный модуль PRMOD. Программа предназначена для интерактивного построения гравимагнитных моделей геологического разреза земной коры. Полученные результаты предназначены, главным образом, для построения начального приближения к решению обратных задач.

Система VECTOR (Авторы: В.М. Новоселицкий, В.А. Кутин, М.С. Чадаев, С.Г. Бычков, Г.В. Простолупов, <http://www.mi-perm.ru/gp/index.html>). В ней реализован метод обработки и интерпретации потенциальных полей, основанный на трансформациях векторов полного горизонтального градиента [10]. Векторная трансформация и сканирование поля векторов с процедурой их последующего интегрирования (восстановления поля) позволяют провести детальное разделение источников аномалий в плане и по глубине с привязкой каждого источника к шкале эффективных глубин. Результатом таких преобразований является модель строения геологической среды, представленная системой срезов приближенных распределений плотностей или намагниченности. Следует отметить, однако, что при этом связь истинных глубин с радиусами скользящих окон интегрирования градиента неоднозначна. Использование компьютерной системы VECTOR позволяет проводить пересчет поля на горизонтальную плоскость, трехмерную интерполяцию и т.д. (рис. 2). В зависимости от выбранных параметров обработки можно выделить гравитационный эф-

а)



б)

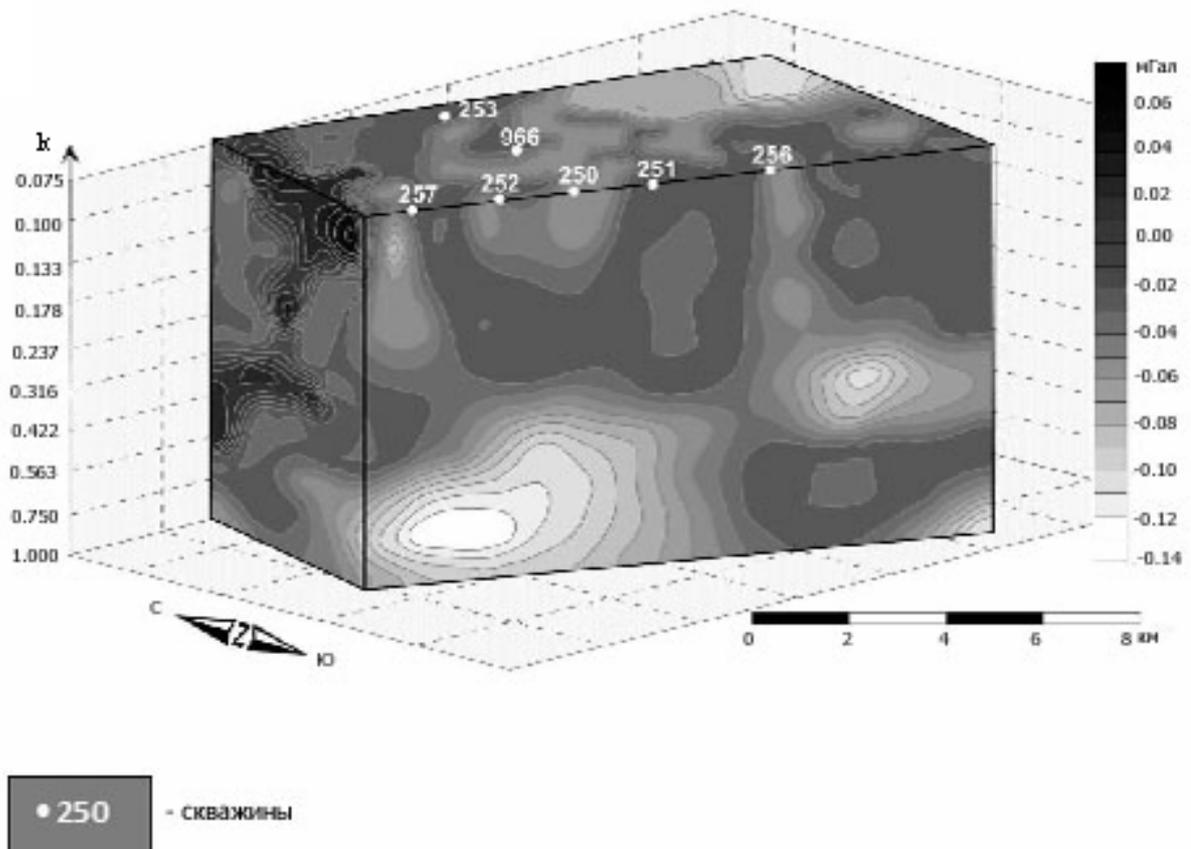


Рис. 2. а) Сравнение разделительных возможностей системы VECTOR и стандартных трансформаций поля, б) Вертикальное сечение трехмерной диаграммы остаточного гравитационного поля Решетниковской площади в системе VECTOR.

фект в наземном поле от любого горизонтального слоя и представить гравитационное поле в объемном виде. Реализуя возможности интерпретации потенциальных полей в системе VECTOR с использованием априорной геологической информации, можно успешно решать сложные геологические задачи, определять глубины залегания источников аномалий и идентифицировать их с определенными геологическими объектами.

Коллективом лаборатории потенциалов полей ГИ УрО РАН разработан метод решения прямой задачи гравиразведки в рамках принципа контактных поверхностей, реализована возможность решения прямых и обратных задач гравиметрии при кусочно-призматической аппроксимации геологических объектов на основе быстрого вейвлет-преобразования. Отдельно следует отметить монтажный метод решения трехмерной нелинейной обратной задачи гравиметрии (В.Н.Страхов, П.И.Балк, А.С.Долгаль), который основан на функционально-аналитическом и вероятностно-статистическом подходах и приводит к компактному множеству возможных решений. Данный вид алгоритмов используется в геофизике при изучении формы и пространственного положения источников поля. Основу его составляет неразрывное единство монтажного способа описания плотностной среды и специального способа построения приближенного решения в классе таких моделей, не связанного с нелинейными методами оптимизации. Это один из многочисленных методов подбора, т.е. последовательной аппроксимации геологического объекта элементарными телами правильной формы в сеточном классе моделей. Тем не менее, учет определенного объема априорной информации позволяет сделать интерпретационные построения геологически содержательными, которые могут быть выполнены за приемлемое число итераций.

Программный пакет СИГМА 3D (Авторы: П.С. Бабаянц, Ю.И. Блох, А.А. Трусов, http://www.pangea.ru/software/sigma_shtml) предназначен для содержательной интерпретации гравимагнитных данных при решении задач геологического картирования, поисков месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых. Отличительной особенностью используемых технологий является сохранение работоспособности при минимальном количестве априорной информации. Пакет содержит следующие программы: ROMGAS – для оценки морфологии субгоризонтальных границ раздела; REIST – для автоматизированного моделирования гравитационного и магнитного полей; DVOP – для вычисления объемного распределения эффективной плотности и эффективной намагниченности; QUASI – для количественной оценки характеристик выбранных пользователем изолированных аномалий; IGLA – для интерактивной количественной экспресс-интер-

претации локальных магнитных и гравитационных аномалий и т.д. Программы основаны на определении координат особых точек функций, описывающих магнитные и гравитационные аномалии, по амплитудному спектру, вычисляемому в скользящем окне; вычислению трансформант потенциальных полей; геологическому редуцированию и т.д. [11] (рис. 3, 4).

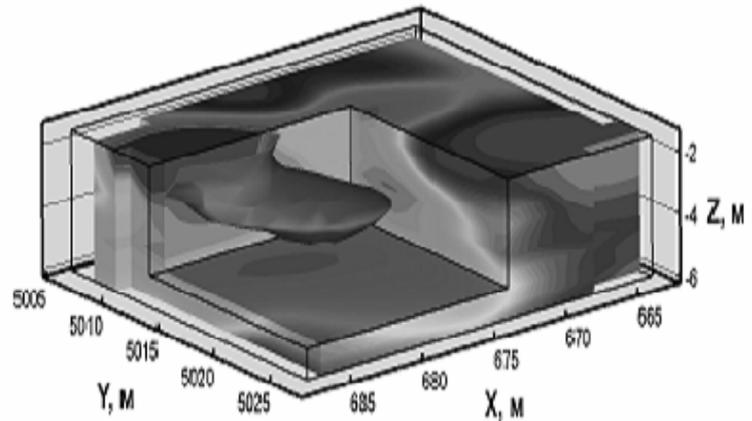


Рис. 3. Трехмерная модель распределения намагниченности, полученная методами интерпретационной томографии с помощью программ пакета СИГМА-3D на Олейниковском нефтяном месторождении Прикаспия.

Несмотря на большое количество решаемых задач, здесь тоже возникают проблемы. Из-за того, что связь между параметрами (координаты особых точек) и характеристиками амалеобразующих объектов различна, при преобразовании поля особые точки не могут трактоваться однозначно.

Разработкой технологий интерпретаций гравимагнитных данных активно занимаются также в Томском государственном, Уральском федеральном, Воронежском университетах и других научных учреждениях. Широко используется компьютерная система ГИС ИНТЕГРО, разработанная в 1992 г. в лаборатории геоинформатики ВНИИГеосистем (г.Москва) и является специализированной геоинформационной системой, которая предназначена для решения задач картопостроения, прогноза полезных ископаемых и моделирования геологического строения земной коры. Она создана, главным образом, для хранения и визуализации разных видов геолого-геофизической информации, вычисления различных преобразований поля, но также оснащена модулями решения прямых и обратных задач в рамках метода подбора многоугольниками, многогранниками, а также в классе 3-D сеточных моделей, где физические свойства приписаны не телу, а точке.

Следует отметить работы, касающиеся усовершенствования решения систем большой размерности при решении прямых и обратных задач. Эту проблему поднимал еще В.Н. Страхов. В этом направлении были разработаны пакеты программ ADG-3D, основанные на адаптивных алгоритмах (А.В.Кочнев и др., Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск). Метод решения

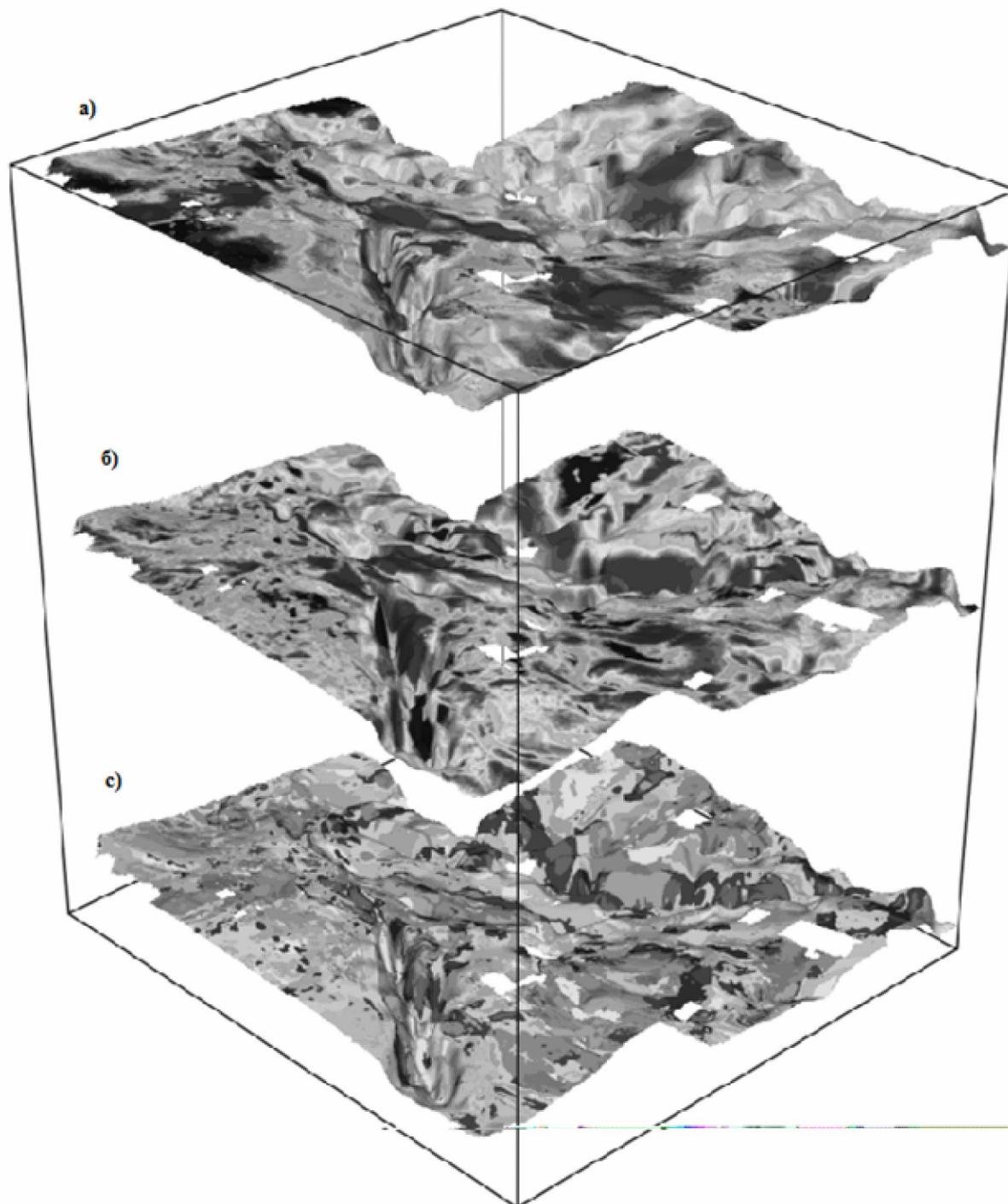


Рис. 4. Пример применения технологий ROMGAS, REIST и CLASS2 в районе Московской синеклизы: а) распределение эффективной намагниченности; б) распределение эффективной плотности; в) результаты двухпараметрической классификации эффективных параметров на рельефе кровли кристаллического фундамента.

сводится к уточнению параметров по невязке последовательно в каждом уравнении. Проходя несколько итераций, получаем последовательное уменьшение невязок, величина которых на последних итерациях характеризует погрешности измерений и погрешности, связанные с неадекватностью физической и математической модели. Как правило, последнее выясняется при решении прямой модельной задачи.

Технология комплексной интерпретации геофизических данных GCIS (Авторы: А.И. Кобрунов, А.П. Петровский и др.). Автоматизированная система GCIS (Geophysical Complex Interpretation System – система интегрированной интерпретации геофизических данных) представляет собой совокупность программно-интерпретационных процедур, направленных на решение задач нефтегазовой

геологии посредством максимального привлечения геолого-геофизических методов (сейсморазведка, гравиразведка) [12]. С помощью системы GCIS возможно: построение 2D и 3D интегрированных моделей геологических объектов; уточнение структурно-тектонического строения геолого-геофизического разреза в условиях низкой информативности данных сейсморазведки; выявление локальных плотностных неоднородностей модели среды для изучения перспективных зон нефтегазоаккумуляции и прогнозирования крупных залежей углеводородов; согласование сейсмогравитационных моделей локальных геологических структур (рис. 5). Реше-

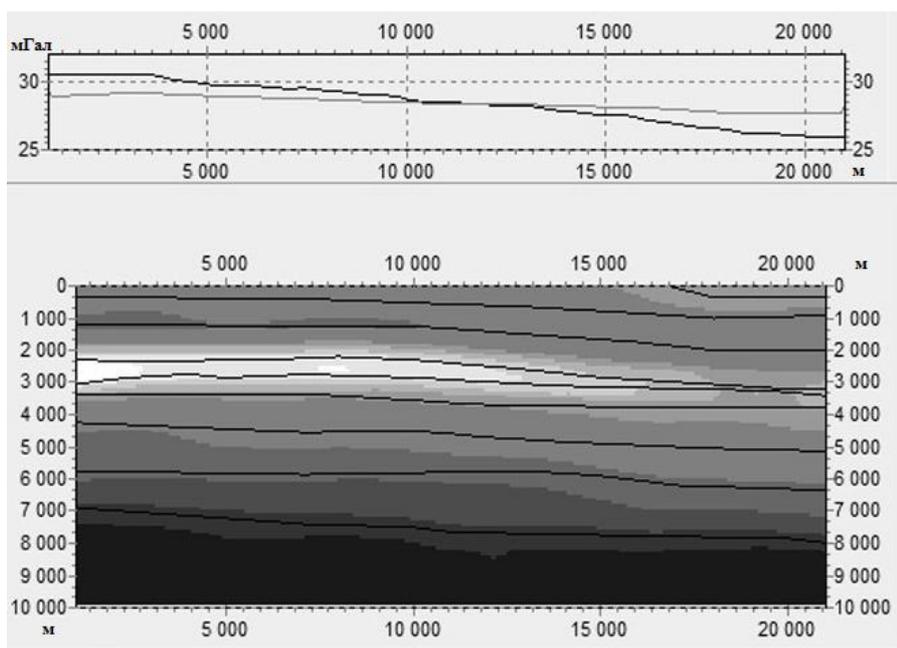


Рис. 5. Интерфейс системы GCIS и структурно-плотностная модель с наблюдаемым и рассчитанным гравитационным полем.

ние обратных задач гравиметрии происходит на основе критериального подхода (поиск оптимальных решений обратной задачи гравиметрии в классе плотностных границ и классе распределений плотности). Наряду с этим осуществляется учет регионального фона в истокообразном и полиномиальном представлениях с учетом влияния боковых зон. Система позволяет контролировать процесс решения обратных задач по характеру изменения невязки, ее статистическим характеристикам. Применение данной технологии дает хорошие результаты, подтверждаемые бурением. Однако она требует задания информации в специальном формате, что усложняет подготовку данных.

В настоящее время в лаборатории математического моделирования УГТУ под руководством А.И. Кобрунова разработана методика сейсмогравитационного моделирования с использованием совместного анализа геолого-геофизических данных на основе решения задач инверсии геофизических полей для проведения объемного структурно-плотностного моделирования сложно построенных геологических сред и обеспечивающая возмож-

ность уточнения их строения [13]. В качестве технологической составляющей используются компоненты интегрированной среды физико-геологического моделирования, разработанной коллективом лаборатории математического моделирования и системного анализа в науках о Земле УГТУ. В её состав входят программный редактор физико-геологических моделей среды GeoVIP, программные модули решения содержательных задач геофизики в двумерной постановке PlayGround и EvDynInversion.

Комплекс GeoVIP (Авторы: А.И. Кобрунов, С.Г. Куделин, М.И. Барабанов) предназначен для интерпретации результатов геофизических исследований, построения моделей среды и поддержки их актуальности за счёт взаимной увязки данных и их корректировки на основе оптимальных решений обратной задачи [14]. GeoVIP представляет собой набор функциональных модулей, объединенных на уровне базы данных и общей программной оболочки: структурно-плотностное моделирование (рис. 6), моделирование электромагнитных параметров, базовый модуль (2D, 3D визуализация, загрузка данных, документация, доступ к другим модулям), скважинное, геодинамическое, сейсмическое моделирование (находится в стадии разработки). Разработаны и включены в программный комплекс алгоритмы интерпо-

ляции структурных границ и распределения параметра для трехмерной модели из двумерных данных (интерполяция по профилям) и процедуры согласования структурно-плотностной модели. Геодинамическое моделирование представлено модификаторами, применяемыми к структурным границам модели с целью: изменить её геометрию сообразно некоторому физическому закону.

Программный модуль PlayGround (Авторы: А.И. Кобрунов, М.И. Барабанов) – инновационная разработка, предназначенная для построения нулевого приближения двумерных структурно-плотностных моделей [15]. В качестве начальных данных используется графическое представление результатов различных исследований. Содержит экспресс-конструктор структурной модели для моделирования структуры геологического разреза и экспресс-конструктор плотностной модели для аппроксимации плотностных неоднородностей набором элементарных тел. Предусматривает решение прямой задачи гравиразведки, оценку невязки вычисленного и наблюдаемого гравитационного эффекта, экспорт результатов обработки (рис. 7).

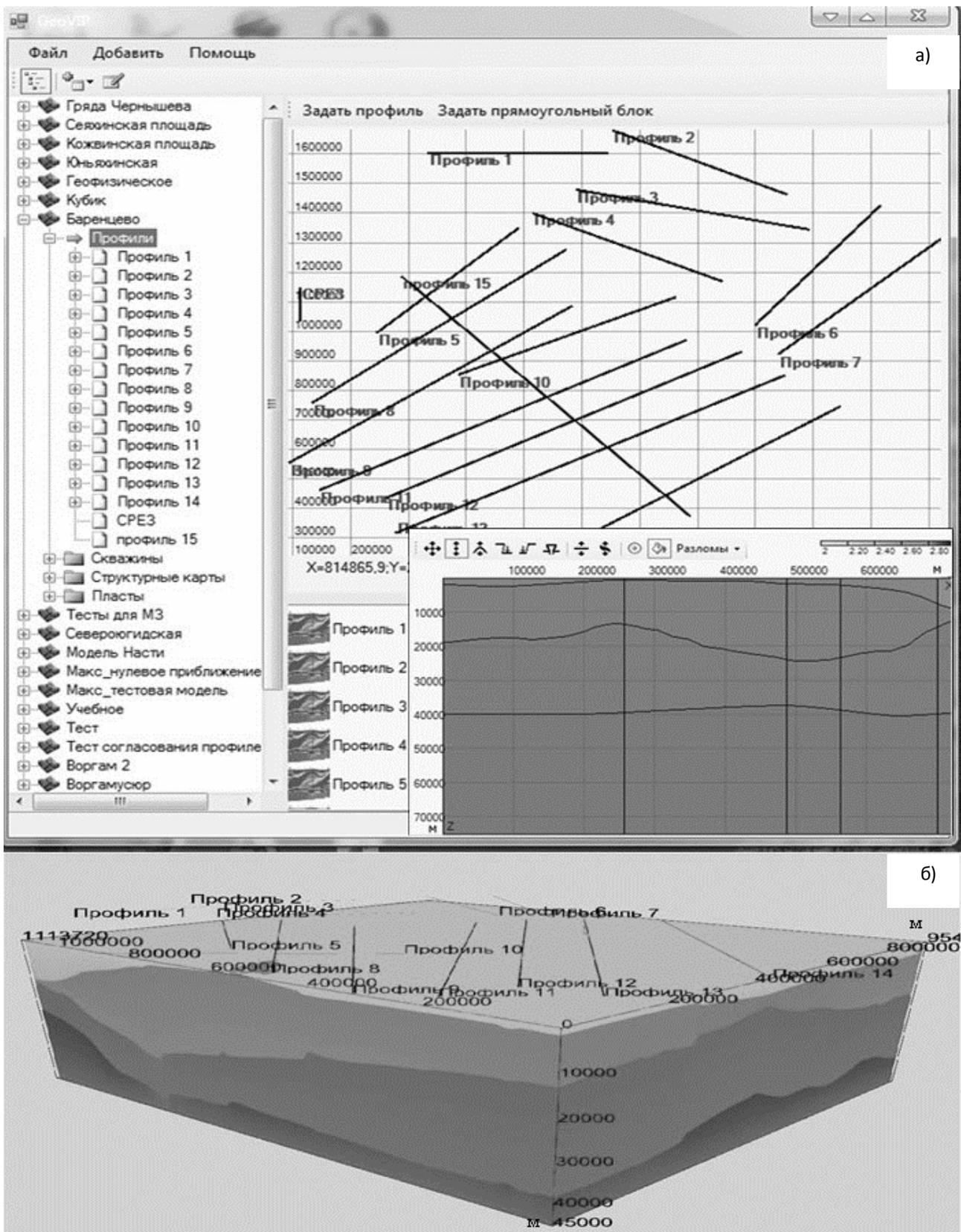


Рис. 6. а) Карта профилей и визуализация одного из 2D профилей; б) Трёхмерная плотностная модель Баренцевоморского региона в GeoVIP.

Программный модуль *EvDynInversion* (Авторы: А.И. Кобрунов, С.Г. Куделин) предусматривает решение обратных двумерных задач гравиразведки на основе объединенного критерия оптимальности и эволюционно-динамического принципа оптимальности [14]. Алгоритм представляет собой итерационную

схему решения обратной задачи с применением уравнений движения материи в качестве составляющей критерия оптимальности. На первом этапе выполняется компенсация невязки за счет сдвиговых деформаций. На втором этапе невязка компенсируется за счет дивергенции. Модели, полученные в результате рабо-



Рис. 7. Формирование структурно-плотностной модели в Playground.

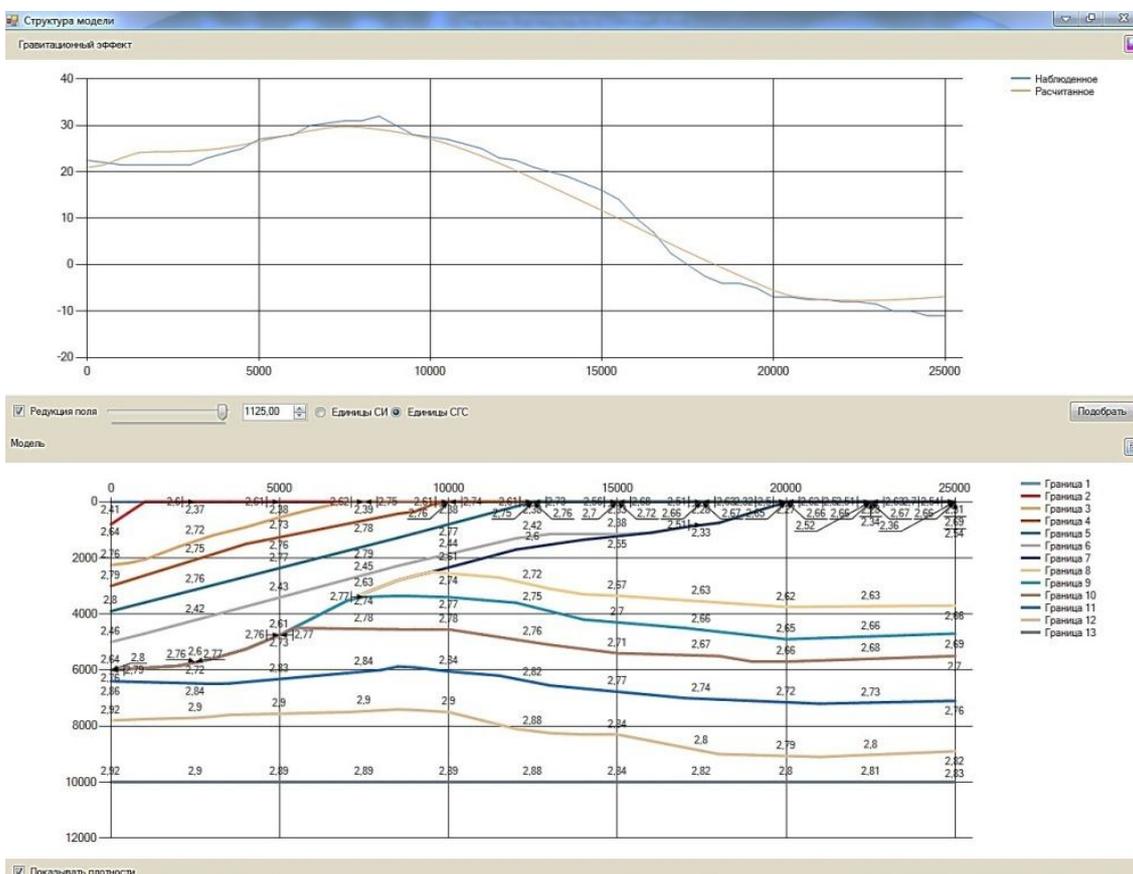


Рис. 8. Результат решения обратной плотностной задачи по модельному профилю в EvDynInversion.

ты модуля, удовлетворяют наблюдаемым потенциальным полям и соответствуют заложенным в процесс решения геодинамическим характеристикам (рис. 8).

Интегрированная среда физико-геологического моделирования имеет единую базу, позволяет проводить обработку геолого-геофизической информации в разных модулях, строить согласованные наблюдаемым полям модели.

Результаты проведенного анализа отечественных технологий интерпретации гравиметрических данных объединены в таблицу.

- дают возможность уточнения модели строения геологической среды не только на этапах поисково-разведочных работ, а также в процессе разработки месторождений с целью контроля за состоянием и динамикой запасов сырья.

Современные методические и программно-алгоритмические комплексы обработки, анализа и интерпретации гравимагнитных данных:

- способствуют повышению надежности, достоверности и эффективности проводимых геолого-разведочных работ при одновременном снижении

Сравнительные характеристики интерпретации потенциальных полей

Интерпретация	Качественная	Количественная	
Решаемые задачи	Задачи обработки	Обратные задачи	
Используемые методы	Фильтрация полей Спектральный анализ Трансформация полей Статистический анализ	Спектральный анализ Методы математической статистики Методы подбора, в том числе: Монтажный метод Генетические алгоритмы Нейросети	Критериальный подход Эволюционно-динамических подход
Результат решения задач	Обнаружение Разделение аномалий	Структурные и плотностные модели в выбранном классе	Структурно-плотностные модели сложнопостроенных многопараметрических сред
Используемые технологии	COSCAD 3D SIGMA 3D VECTOR	SIGMA 3D (Riest) VECTOR COSCAD 3D	GCIS GeoVIP (EvDynInversion)
Особенности	Обнаружение и выделение аномалий потенциальных полей. Эффективно использование при формировании начальных приближений в решении обратных задач.	Моделирование неэффективно для сложнопостроенных сред. Применяется для построения упрощенных моделей, в связи с чем возникает недоучет априорной информации, скрытая эквивалентность. Особые точки не могут быть интерпретированы однозначно.	Создание достоверных геоплотностных моделей среды с учетом максимума априорной информации, в том числе о ее генезисе, что позволяет уменьшить эффекты эквивалентности.

Заключение

В настоящее время организациями нефтегазоразведочной отрасли в основном применяется комплексная интерпретация геолого-геофизических данных с использованием методов качественного и количественного анализа, позволяющая выявлять неоднородности и структурные особенности, влияющие на развитие зон нефтегазоаккумуляции.

Технологии обработки и анализа потенциальных полей (включая фильтрацию, трансформации, спектральное разложение полей и др.) на основе различных разделов математики предназначены для качественной интерпретации и уточнения начальных приближений при решении обратных задач.

Технологии построения физико-геологических моделей сред, основанные на решении обратных задач:

- используются для создания единой согласованной геофизической полей модели;
- позволяя детально изучать геологическое строение осадочных толщ;
- направлены на вовлечение максимального объема имеющейся информации;

стоимости поисково-разведочных работ и нагрузки на окружающую среду;

- постоянно совершенствуются с учетом новейших теоретических разработок, развития компьютерной техники и измерительной аппаратуры;
- достаточно универсальны и могут быть использованы для решения различных геологических задач.

Однако в технологиях, связанных с обратными задачами геофизики, существуют проблемы: наличие эквивалентности; неоднозначность решения; недостаток априорной информации, а в некоторых методах и недоучет (трансформации, фильтрации полей).

Учитывая результаты проведенного анализа, можно сделать вывод, что несмотря на большое количество программных продуктов, на данном этапе возникает потребность в создании новой технологии комплексного анализа для изучения геологического строения. Она должна обеспечивать согласованность результатов интерпретации методов и быть ориентирована на единую информационную базу, используемую в интерактивном режиме. В лаборатории математического моделирова-

ния и системного анализа в науках о Земле УГТУ с учетом этих требований разрабатывается интегрированная среда физико-геологического моделирования, в состав которой входят программный редактор физико-геологических моделей среды GeoVIP, а также программные модули PlayGround и EvDynInversion. В решении задач инверсии используются критериальный и эволюционно-динамический подходы. Это позволяет максимально учитывать априорную информацию, включая данные об эволюции и генезисе рассматриваемой геологической среды и проводить построение сбалансированных физико-геологических моделей, согласованных потенциальным полям.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)».

Литература

1. *Кобрунов А.И.* Геомоделирование на основе инверсии системы геофизических данных // Вестник Центральной комиссии по разработке месторождений углеводородного сырья Роснедра. 2012. №2. С. 46–51.
2. *Никитин А.А.* Теория и практика статистических методов комплексной интерпретации геоданных // Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Воронеж, 2012. С.199–202.
3. *Бычков С.Г., Симонов А.А.* Эволюция программно-алгоритмического обеспечения обработки и интерпретации гравиметрических материалов // Горное эхо. Вестник Горного института. №2(28). Пермь, 2007. С. 38–42.
4. *Приезжев И.И.* Информационные технологии комплексной интерпретации геофизических данных для геологического моделирования: Дис. докт. техн. наук. М.: РГГУ, 2010. 225 с.
5. *Галуев В.И.* Методика и компьютерная технология физико-геологического моделирования строения земной коры (ГИС ИНТЕГРО-ГЕОФИЗИКА): Дис. докт. техн. наук. М.: ВНИИгеосистем, 2009. 181 с.
6. *Блох Ю.И.* Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие для студентов университетов и ВУЗов, обучающихся по специальности 080400 «Геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых». М., 2009. 232 с. <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-2009.pdf>
7. *Кобрунов А.И.* Математические основы теории интерпретации геофизических данных: Учебное пособие. М.: Из-во ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 286 с.
8. *Михайлов В.О. и др.* Геодинамические модели и их применение при совместной интерпретации геологических и геофизических данных (обзор) // Физика Земли. 2007. №1. С. 4–15.
9. *Петров А.В., Хоу Сюели.* Библиотека решений компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D//Материалы 38-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 224–226.
10. *Бычков С.Г., Фурман С.Г.* Комплексирование гравиразведки и сейсморазведки 3D при изучении месторождений нефти и газа // Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Воронеж, 2012. С.54–58.
11. *Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А.* Возможности структурно-вещественного картирования по данным магниторазведки и гравиразведки в пакете программ СИГМА-3D // Геофизический вестник. 2004. № 3. С. 11–15.
12. *Кобрунов А.И., Петровский А.П., Моисеенкова С.В.* Автоматизированная система комплексной интерпретации сейсмогравиметрических данных // Международная геофизическая конференция: Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2000. С. 534–535.
13. *Мотрюк Е.Н., Вельтистова О.М.* Апробация программных модулей на примере моделирования строения Воргамусурской структуры гряды Чернышева // Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Воронеж, 2012. С. 189–194.
14. *Кобрунов А.И., Куделин С.Г., Барабанов М.И.* Программный комплекс создания и поддержки геолого-геофизических моделей среды «GeoVIP» и его функциональные возможности // II научно-практическая молодежная конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность»: Материалы конференции (6–7 октября 2010 г.). М., 2010. С. 18
15. *Кобрунов А.И., Кулешов В.Е., Куделин С.Г., Барабанов М.И.* Математическое обеспечение технологии эволюционно-динамического моделирования при инверсии геофизических данных // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. 2011. №2. С. 26–34.

Статья поступила в редакцию 25.12.2012.

УДК 550.837.6

ВЫЯВЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО УРОЧИЩА ПЫМВАШОР (ГРЯДА ЧЕРНЫШЕВА) МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Ю.Г. ШВАРЦМАН*, С.А. ИГЛОВСКИЙ**, Д.П. ГОРШКОВ**

*Северный (Арктический) Федеральный университет, г. Архангельск

**Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск

Shvartsman2007@yandex.ru

pinegadenis@yandex.ru

Приведены результаты георадиолокационных работ, впервые выполненных для изучения гидрогеологических условий и подповерхностного залегания пород в гидротермальном урочище Пымвашор (гряда Чернышева). Полученные материалы сопоставлены с имеющимися данными по тектонике и геотермии гряды Чернышева и сопредельных территорий. Авторами выявлены вертикальные зоны раздробленности и обводненности подстилающих пород ландшафтов, по которым поднимаются термальные воды.

Ключевые слова: Большеземельская тундра, гряда Чернышева, гидротермальные источники, геологическое строение, георадиолокация

YU.G.SHVARTSMAN, S.A.IGLOVSKY, D.P.GORSHKOV. REVEALING OF HYDROGEOLOGICAL PARTICULARITIES OF PYMVASHOR HYDROTHERMAL SPRING (CHERNYSHEV RIDGE) BY GPR

The results of GPR work performed for the first time to study the hydrogeological conditions and substrate bedding of rocks in Pymvashor hydrothermal spring (Chernyshev Ridge) are presented. The materials obtained are compared with the available data on the tectonics and geothermal conditions of Chernyshev Ridge and adjacent areas. The authors identified vertical zones of fragmentation and water encroachment of landscape bedrocks by which the thermal waters rise.

Key words: Bolshezemelskaya tundra, Chernyshev ridge, hydrothermal spring, geological structure, GPR

Введение

Существенное внимание исследователи уделяют локальным районам, находящимся под влиянием аazonальных географических факторов. Одним из таких факторов является разгрузка термальных вод, формирующая на земной поверхности водотоки с повышенной температурой воды – горячие источники и образующиеся от них ручьи. В пределах материковой части Северной Европы одним из немногих гидротермальных проявлений являются горячие источники Пымвашор на востоке Большеземельской тундры (67°09' с.ш., 60°51' в.д.) (рис. 1). Эти источники располагаются в труднодоступном районе, удаленном от населенных пунктов, где в слаборазрушенном состоянии сохранилось гидротермальное урочище. Источники исследовались с середины XIX в. При участии авторов данной статьи в 2011 г. вышла коллективная монография «Функционирование субарктической гидротермальной экосистемы в зимний период» [1]. После ее издания авторы приняли участие в новых летней и зимней экспедициях в урочище Пымвашор, материалы которых послужили основой данной статьи.

При применении метода георадиолокации в урочище Пымвашор появилась возможность выделить структурные нарушения в подстилающих породах в зоне разгрузки термальных вод, а также описать типичные для урочища георадиолокационные разрезы до глубины 35 м. Подобные геолого-геофизические исследования ранее не проводились.

Объект и методика исследований

Термальные источники Пымвашор принадлежат к бассейну р. Адзвы – правого притока р. Усы. В геологическом плане район исследований относится к активной складчатой структуре – гряде Чернышева. В гипсометрическом отношении гряда представляет собой пологий увал протяженностью до 300 км с абсолютными высотами до 200 м. В основании гряда Чернышева сложена складчатыми породами палеозоя, преимущественно известняками и песчаниками. Поверхность гряды платообразная.

Определено, что ядром урочища является ручей Пымвашор, который окаймляют последовательно фация кустарников, луговая фация, фация еловых реди и, наконец, границей урочища можно

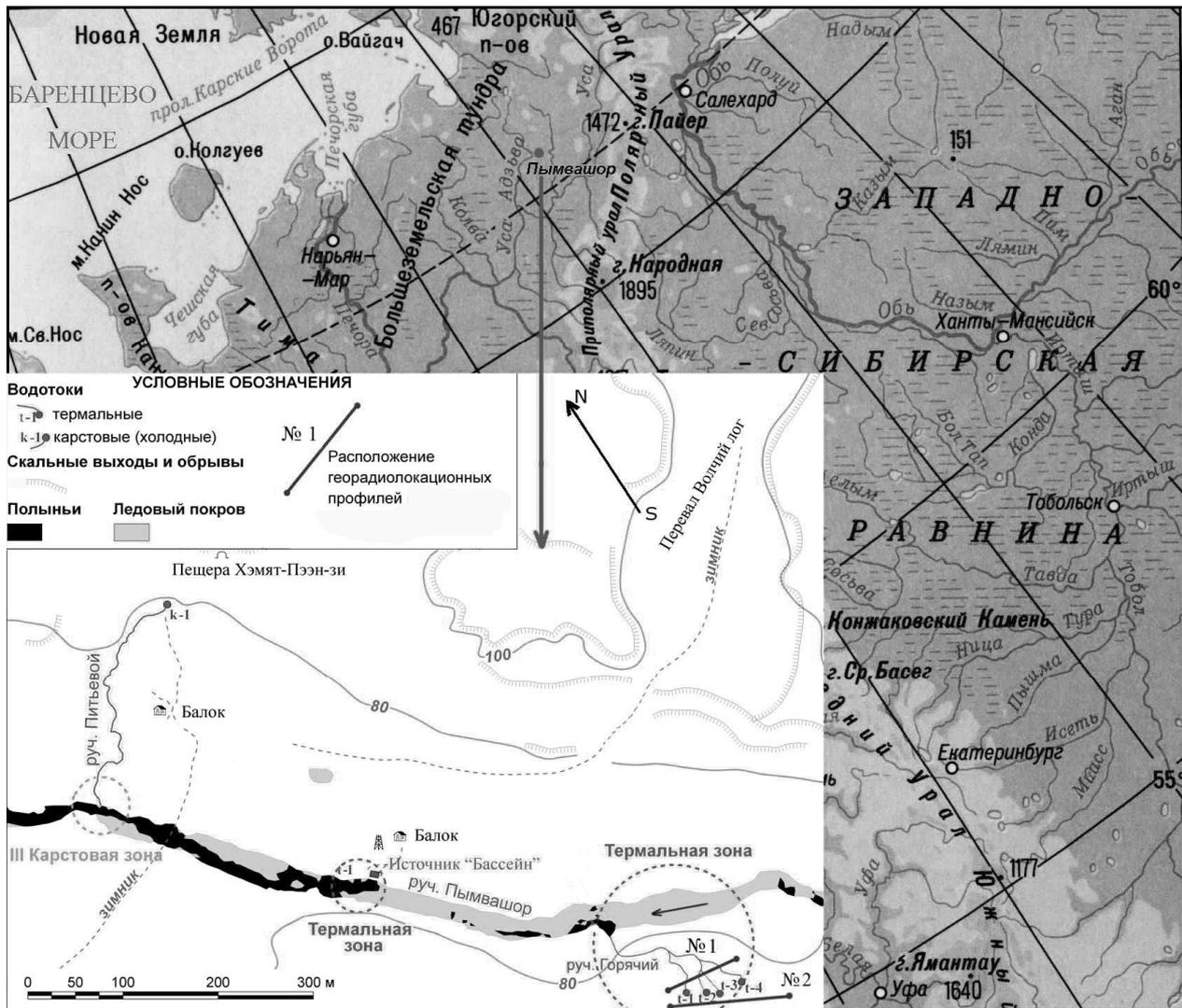


Рис. 1. Географическое положение урочища Пымвашор и расположение георадиолокационных профилей: №1 – по горячим источникам; №2 – на склоне над горячими источниками.

считать скальные обнажения и крутые склоны, выходящие на водораздельную тундру [2].

При изучении структуры подстилающих пород ландшафтов использовался георадар SIR - 3000 (GSSI, США). Основной задачей полевых работ, которые проводились в октябре 2009, августе 2010 и декабре 2011 гг. было определение зон разломов, по которым поднимаются воды, а также специфики влияния термальных источников на породы зимой. Нами выбраны георадиолокационные низкочастотные экранированные антенны Subecho-40 (40 МГц), Subecho-70 (70 МГц) (Geoscanners, Швеция). Они корректно функционируют до глубин 35 и 25 м соответственно и устанавливаются на специальной тележке, снабженной одометром, что позволило корректно определить протяженность георадиолокационных профилей. Постобработка данных проводилась в комплексе Radan 6.5 (GSSI, USA) с применением методов деконволюции и преобразования Гильберта.

Целью георадиолокации является определение положения границ раздела или локальных объектов в изучаемых отложениях. При интерпретации

георадарограмм картина георазреза не всегда однозначна. В случае георадиолокационных измерений оси синфазности отраженных электромагнитных волн приурочены в основном к границам слоев с различной литологией. При выделении комплексов пород необходимо установить и проследить в их кровле и подошве несогласные границы [3, 4]. В исследуемых средах такими границами раздела могут являться контакт между сухими и влагонасыщенными комплексами и контакты между породами различного литологического состава и т.д. [3].

Геолого-геофизическое строение урочища Пымвашор и сопредельных территорий

Пымвашор расположен в северной части Тимано-Печорской плиты. Западно-Тиманский краевой шов отделяет Мезенскую синеклизу Русской плиты от Тимано-Печорской плиты. Фундамент Тимано-Печорской плиты сложен позднепротерозойскими осадочно-метаморфическими и магматическими породами.

Разломы кайнозойского возраста выделяются по геоморфологическим данным, дешифрированию космических снимков, материалам геологических съемок. Они установлены на всей территории бассейна. Среди них две группы. Первая – активизация древних разломов всех направлений, вторая – вне этих зон. Они имеют незначительные размеры и амплитуды смещений и развиты только в верхних горизонтах платформенного чехла. Их возникновение обусловлено ростом неотектонических структур, а также развитием локальных складкообразовательных движений на севере плиты в позднем мезозое-кайнозое.

Пересчет с карты наблюденного гравитационного поля в нижнее полупространство до глубины около 1 тыс. км показал, что породы Тимано-Печорской плиты обладают повышенными и пониженными значениями плотности [5]. Предполагается, что плотные породы являются малопроницаемыми для глубинных горячих массопотоков, т.е. относительно холодными, а разуплотненные, проницаемые породы относительно более горячими. Карта температурного режима консолидированной коры плиты по данным Н.Ю. Цехановской показывает наличие холодных и горячих участков коры до поверхности Мохо [5]. Стабильно горячие участки располагаются в пределах Коротайхинской и Косью-Роговской впадин. Степень соответствия температурных полей земной коры и мантии достигает 80 %. Относительно стабильные холодные и горячие участки прослеживаются на всю глубину разреза. По данным Н.В. Конановой [5], гряда Чернышева отмечается пониженными температурными характеристиками осадочного чехла, консолидированной части земной коры и образует горст, ограниченный с обеих сторон крупными сбросами. Гряда Чернышева представляет собой интенсивное неотектоническое поднятие [6]. Плотность глубинного теплового потока в центральной части Тимано-Печорской плиты достигает 50–60 мВт/м², а в Предуральском прогибе не превышает 35–45 [7].

Источники Пымвашор находятся в пределах понижения рельефа местности на западной окраине гряды Чернышева. Понижение это имеет форму, близкую к прямоугольнику, вытянутому в северо-восточном направлении, длиной до 8 км и шириной от 2,5 до 3 км. Абсолютные высоты рельефа на этом участке колеблются в пределах от 100 до 120 м, что ниже высот окружающей местности в среднем на 50 м. Внутри понижения рельефа выделяется узкое (от 0,5 до 1 км) линейное поднятие выходов известняков нижнего карбона длиной от 4 до 5 км. Именно на пересечении этого поднятия ручьем Пымвашор и находятся термальные источники. Скорее всего, участок этот представляет собой дизъюнктивный узел пересечения разломов северо-восточного и северо-западного направлений [1].

Источники приурочены к полосе развития нижнекаменноугольных известняков [8]. Всего их насчитывается 13 с различной температурой вод (максимально до 28,5°C). Воды источников слаботермальные, трещинно-пластовые и трещинно-жильные, высоконапорные, газируют.

Интерпретация георадарных профилей

На исследуемой территории авторами были выполнены 34 георадарных профиля с дублированием на разных глубинах и показателем диэлектрической проницаемости от 8 до 12 ед. через основные ландшафты (рис. 1). Два разреза приведены и анализируются в статье.

На рис. 2А представлен фрагмент георадиолокационного профиля № 1 с выделенными авторами литологическими горизонтами, на котором показанные точками границы разделяют влагонасыщенные светло-серые известняки, песчаники (верхняя часть профиля) от аргиллитов со слоистыми известняками. Хорошо выделяются обводненные зоны разгрузки термальных вод, их границы показаны сплошной линией в пределах вертикальных разломов, разрывающих эти зоны. По этим каналам, уходящим глубже 35 м, поднимаются термальные воды. Границы между литологическими подразделениями четкие.

На рис. 2Б – георадарограмма указанного профиля, обработанная методом деконволюции. Он служит для сжатия зондирующего импульса, с которым получена георадарограмма уменьшения его длительности, соответствующего снижению интервала на трассе, «закрытого» отраженной волной, и тем самым повышения возможности выделить на записи оси синфазности отраженных волн от близких границ или объектов [4]. Использование метода деконволюции усложняет интерпретацию профиля, так как значительное увлажнение территории при обработке данным методом считается кратными волнами, и интенсивность увлажнения на георадиолокационном профиле существенно снижается.

На рис. 2В показан георадиолокационный профиль №1 с выполненным преобразованием Гильберта. Данный вид математической обработки предназначен для преобразования каждой трассы в один из трех новых видов, которая сводится к тому, что трасса – действительная функция времени – представляется в виде комплексной функции со своими модулем и фазой. Вычисляются именно эти величины как функции времени и в дополнение к ним амплитуда Гильберта – преобразования как функция времени. Амплитуда Гильберта – преобразования соответствует огибающей исходного сигнала. Такое представление бывает полезным при необходимости выделить на георадарограмме области с характерным типом записи, отличающимся от соседних областей профиля, более высокой или более низкой энергией сигнала [3]. Применение этого метода обработки существенно подчеркивает границы между литологическими слоями и упрощает дальнейшую его интерпретацию, так как мгновенная частота указывает на участки записи с различным частотным составом, что не так четко наблюдается на исходной георадарограмме.

Типичный разрез адзвинской свиты характеризуется многократным чередованием песчаных и глинистых, изредка известковистых пород общей мощностью около 80 м, обнажающихся почти не-

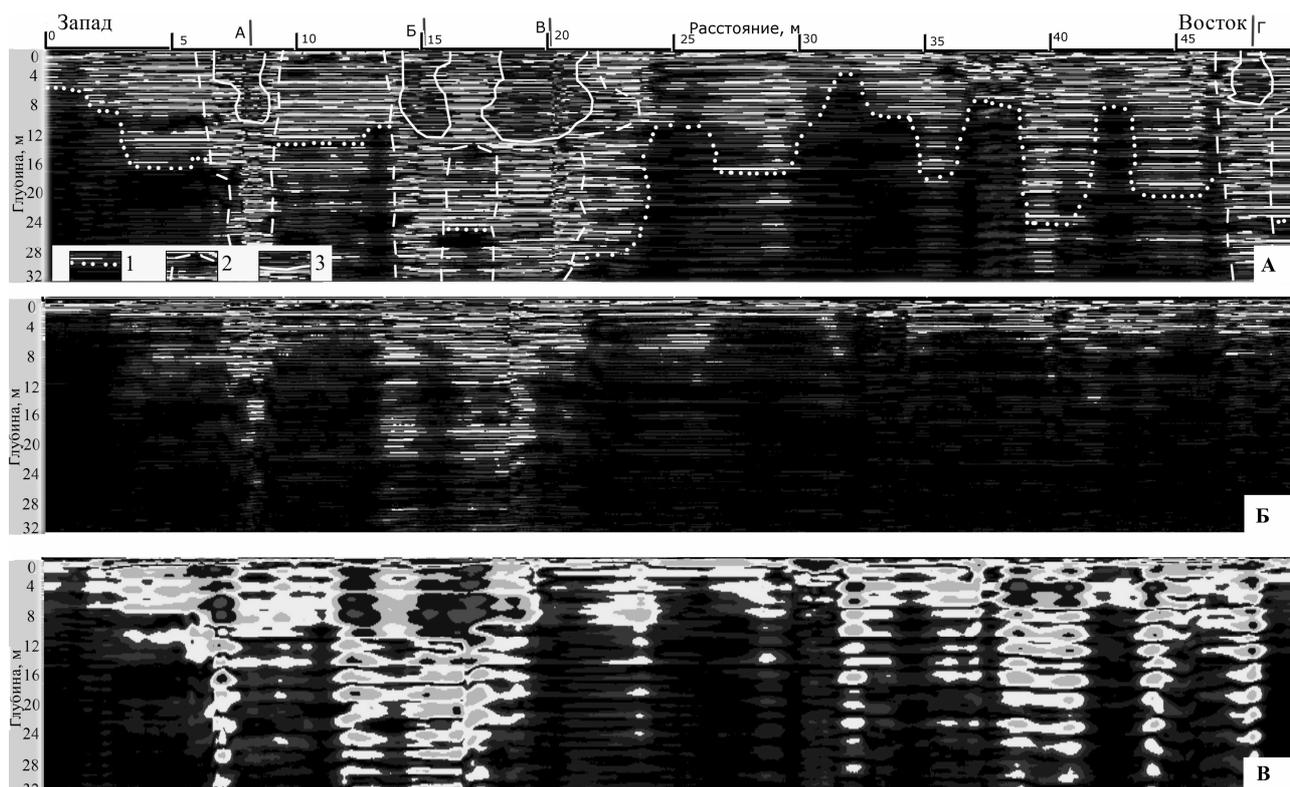


Рис. 2. А – Фрагмент георадарограммы (ноябрь 2009 г.) (профиль 3) (местоположение см. рис. 1). Условные обозначения. Границы: 1 – разделяющие влагонасыщенные светло-серые известняки, песчаники от аргиллитов со слоистыми известняками; 2 – вертикальных каналов, по которым поднимаются термальные воды; 3 – наиболее обводненных зон в пределах вертикальных каналов. Источники: А – 1, Б – 2, В – 3, Г – 4. Б – Фрагмент георадарограммы (профиль 3) с обработкой георадарограммы методом деконволюции. В – Фрагмент георадарограммы (профиль 3). Выполнено преобразование Гильберта.

прерывно по берегам р. Адзвы. По данным геологических разрезов в урочище Пымвашор [9] отложения до 35 м представлены мелкокристаллическими светло-серыми известняками, которые выделены однородным массивом, с единой литологией и стратиграфией, что в целом при отрицательных температурах сказывается на прохождении сигнала через породы и затрудняет интерпретацию полученного материала. При этом можно выделить косослоистое залегание пород, что, по-видимому, связано с их смятием в результате раздробления урочища разломами и вымывания песчаников из нижележащих горизонтов. Со структурами подобного типа связана восходящая деятельность подземных термальных источников, по которым поднимаются и разгружаются воды «Горячей горы».

Профиль № 2 (рис. 3) располагается на участке скального массива над горячими источниками. Обнажения на скальном массиве помогают в интерпретировании данного профиля. Породы на этом участке смяты в мелкие складки в западном направлении. На георадарограмме наблюдаются наклонные оси синфазности (косослоистый тип отложений в правой части разреза). На месте древнего, в настоящее время не функционирующего источника, в левой части разреза на глубинах от 10 до 17 м наблюдаются сильно увлажненные слои. Эта обводненность более интенсивна, чем на участке профиля, на котором находятся действующие термальные источники.

Питание термальных источников взаимосвязано, а в наиболее раздробленных зонах осуществляется разгрузка вод, что видно на примере четырех источников, которые расположены ниже более древнего, в настоящее время не изливающегося источника.

На рис. 3Б профиль обработан преобразованием Гильберта. Применение данного метода подчеркивает границы между литологическими слоями, однако при этом обнаружение косослоистого залегания слоев затруднено в связи с функциональными особенностями данного метода. На рис. 3В профиль обработан методом деконволюции (повышением разрешающей способности). Данный метод позволил более детально подчеркнуть косослоистое залегание слоев на трассе профиля.

Гипотезы происхождения термальных вод

Природа солоноватых слабоминерализованных хлоридно-натриевых вод Пымвашора может быть связана либо с их инфильтрацией (поднимающихся по разлому с больших глубин), либо с ранее отложенными водами, которые в результате тектонических движений двигаются и смешиваются с инфильтрационными водами. Химический и газовый состав вод не позволяет однозначно определить их генезис [10].

А.А. Чернов [11] предполагал, что термальные воды поднимаются с глубин свыше 800 м, где сбрасыватель должен быть в контакте с верхнеде-

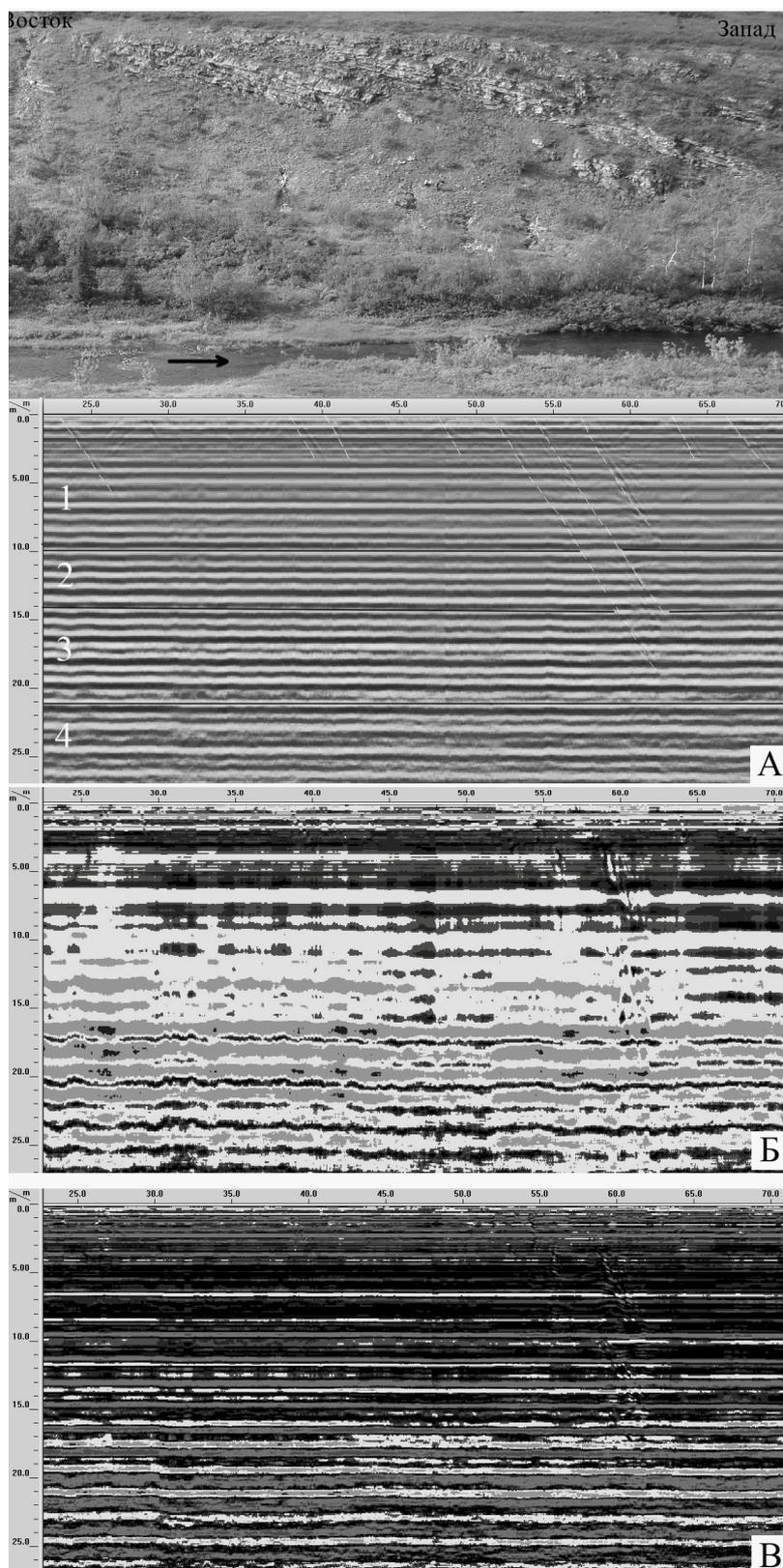


Рис. 3. Фрагмент георадарограммы на участке скального массива над горячими источниками (август 2010 г.) (профиль № 2). А (без математической обработки): 1 – поверхностные отложения (мелкокристаллические известняки), 2 – слоистые известняки и аргиллиты, смятые в мелкие складки, 3 – обводненная зона разгрузки термальных вод, 4 – слоистые известняки и аргиллиты; Б – с преобразованием Гильберта; В – с преобразованием методом деконволюции.

вонскими осадками. Как H_2S , так и $NaCl$ источники могут получать из толщи битуминозных пород верхнего девона.

К.К. Волоссович [8] связывал возникновение источников с постмагматической деятельностью кайнозойской интрузии основного состава на основании присутствия в сернистом осадке воды источников микроэлементов, характерных для эманации основной магмы. Эта гипотеза не противоречит предположению А.А. Чернова [11], а оба процесса (инфильтрация атмосферных вод, их нагрев и минерализация на глубине под действием молодой интрузии) могут протекать одновременно. Природа этого явления связывается с надвиговыми движениями от Урала, а также, возможно, с оживлением вулканической деятельности в позднемезозойское – кайнозойское время [6].

По неопубликованным материалам Н.Ю. Егоровой, температуры на поверхности кристаллического фундамента отмечаются от 100 до 110°C при ее глубине от 5 до 7 км, а на поверхности средневизейских – нижнепермских осадков примерно от 20 до 30°C. Соответственно геотермический градиент на гряде Чернышева определяется в диапазоне от 1,6 до 2,2°C/100 м. Примерно те же значения градиента мы получаем при плотности теплового потока 50 мВт/м² и коэффициенте теплопроводности около 2,5 Вт/м×К, т.е. наиболее вероятные значения градиента можно принять не более 2°C/100 м. Таким образом, глубина образования термальных вод Пымвашора определяется не менее 1400 м. А.И. Рубцовым [12] область питания источников зафиксирована на границе нижнедевонских и франских отложений.

В газовом составе самых «горячих» источников Пымвашор присутствует малая (<1%) примесь мантийного гелия [13]. Авторы предполагают, что воды источников формируются в зоне активного водообмена и имеют преимущественно инфильтрационное происхождение.

Несмотря на общее сходство изотопных характеристик речных и минеральных вод, формирование последних явно происходит не за счет современных атмосферных осадков, а, вероятно, более древних пресных вод. На это указывают небольшие различия в значениях содержания дейтерия в водороде (δD) и изотопа ^{18}O в кислороде ($\delta^{18}O$), отмечаемые

при сравнении речных и минеральных вод, а также отсутствие для минеральных вод четко выраженной зависимости изотопных характеристик от их географического положения. Судя по оценкам пластовых температур по гидрохимическим геотермометрам, нагрев воды происходит за счет проникновения атмосферных вод на глубины от 1 до 2 км. Очевидно, что область их питания располагается в северной части Уральского кряжа, а места разгрузки маркируют тектонически ослабленные зоны в пределах поднятий Предуральского краевого прогиба [10]. Происхождение термальных вод может быть связано с действием интрузии и инфильтрацией атмосферных осадков, нагретых в соответствии с геотермическим градиентом на глубинах до 1,5 км и выведенных по разломам на дневную поверхность.

Заключение

Георадиолокационные исследования позволили выделить вертикальные зоны повышенной неоднородности (раздробленности) и обводненности подстилающих пород ландшафтов, по которым разгружаются термальные воды. Георадиолокационное сканирование участка над горячими источниками показало ряд клиновидных структур, проникающих на глубины свыше 35 м. С подобного рода структурами связана восходящая деятельность термальных источников, по которым поднимаются и разгружаются воды источников. Возможно, питание термальных источников взаимосвязано, а в наиболее раздробленных зонах осуществляется разгрузка вод. Это отмечается на примере четырех источников, которые расположены ниже более древнего, в настоящее время не изливающегося. Природа термальных вод может быть связана с действием остывающей интрузии, а также с инфильтрацией атмосферных осадков, нагретых в соответствии с геотермическим градиентом на глубинах до 1,5 км и выведенных по разломам на дневную поверхность. Над источниками авторами отмечен косослоистый тип отложений. На месте древнего, в настоящее время не функционирующего источника на глубинах от 10 до 17 м наблюдаются сильно увлажненные литологические горизонты. Возможно, ранее этот источник был водообильнее действующих источников. Обводненность на участке профиля под древним источником (на глубине от 14 до 20 м), несмотря на отсутствие современного выхода вод на поверхность, более интенсивна, чем на участке с действующими термальными источниками.

При геолого-геофизических исследованиях гидротермальных источников георадар SIR-3000 и антенны Subecho могут быть применены для построения приповерхностных геологических разрезов, определения положения уровня термальных вод, границ согласного и несогласного залегания литологических слоев с различным показателем диэлектрической проницаемости. Накопленный к настоящему моменту теоретический и практический опыт показывает, что в случае георадиолокационных измерений оси симфазности отраженных электромагнитных волн приурочены в основном к границам слоев с различной литологией, выявление которых и являлось основной целью данной работы.

Исследования выполнены при поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых МД-4164.2011.5, РФФИ № 11-05-98806-р_север_а; № 10-04-00897, 11-04-98817, программ фундаментальных исследований УрО РАН № 12-П-5-1014, 12-М-45-2062, 12-У-5-1022.

Литература

1. *Кол. авторов.* Функционирование субарктической гидротермальной экосистемы в зимний период. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 252 с.
2. *Полякова Е.В., Гофаров М.Ю.* Применение аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата при составлении цифровой модели местности (на примере субарктического термального урочища Пымвашор) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2012. №3 (11). С. 52–56.
3. *Старовойтов А.В.* Интерпретация георадарных данных. М.: МГУ, 2008. 192 с.
4. *Daniels D.* Ground-penetrating radar. 2nd ed. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2004. 734 p.
5. *Конанова Н.В.* Строение мантии Печорской плиты // Геология и минеральные ресурсы европейского Северо-Востока России: новые результаты и новые перспективы. Материалы XIII Геологического съезда Республики Коми. Т.П. / Институт геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 1999. С. 19–21.
6. *Мальшев Н.А.* Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов европейского Севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 270 с.
7. *Шапов В.А.* Геотермические исследования Урала: Автореф. докт. дис. Екатеринбург, 2006. 44 с.
8. *Гидрогеология СССР.* Т.ХЛII. Коми АССР и Ненецкий национальный округ Арх. обл. РСФСР. М.: Недра, 1970. С. 180–191.
9. *Першина А.И.* Силурийские и девонские отложения гряды Чернышева. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 118 с.
10. *Митюшева Т.П., Лаврушин В.Ю.* Сероводородные источники гряды Чернышева // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч.-практ. конф. Перм. ун-т. Пермь, 2007. С. 232–235.
11. *Чернов А.А.* Сероводородные источники некоторых новых районов Печорского края, имеющие признаки нефтеносности и газоносности // Природные газы. 1932. № 3. С. 95–105.
12. *Рубцов А.И.* Поисковые работы на закрытых территориях (новое в методических подходах) // Геология и минеральные ресурсы европейского Северо-Востока России. Новые результаты и новые перспективы: Материалы XIII Геологического съезда Республики Коми. Т.IV. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 1999. С. 252–254.
13. *Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Прасолов Э.М.* Первые данные об изотопном составе инертных газов (He, Ar) в термальных источниках гряды Чернышова (северо-западное Приуралье) // XVIII симпозиум по геохимии изотопов им. акад. А.П.Виноградова/М.: ГЕОХИ РАН, 2007. С. 194.

УДК 539.374.

МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ ЮНГА НИКЕЛИДА ТИТАНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

И.Н. АНДРОНОВ, Н.П. БОГДАНОВ, Н.А. СЕВЕРОВА, А.В. ТАРСИН

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта
iandronov@ugtu.net

В статье приводятся результаты экспериментального изучения и численного моделирования зависимости упругих постоянных никелида титана от температуры.

Ключевые слова: мартенситные превращения, никелид титана, упругие постоянные

I.N. ANDRONOV, N.P. BOGDANOV, N.A. SEVEROVA, A.V. TARSIN. **METHOD OF QUANTITATIVE DESCRIPTION OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF NITi YOUNG'S MODULUS**

The paper presents the results of experimental studies and numerical modeling of NiTi elastic constants temperature dependence.

Key words: martensitic transformations, titanium nickelide, elastic constants

В ряде работ сообщалось, что в материалах с обратимыми мартенситными переходами упругие постоянные, например модуль Юнга, сложным образом зависят от температуры [1,2]. Отмечено, что при нагревании материала через интервал обратного мартенситного перехода модуль Юнга может сильно изменяться, уменьшаясь в три-пять раз и достигая локальный минимум примерно в середине интервала обратного мартенситного перехода. В связи с этим была поставлена задача экспериментального изучения зависимости эффективного модуля Юнга от температуры.

В работе применялась экспериментальная методика, описанная в [7]. В качестве объекта исследований использовали проволоку из сплава ТН-1 с длиной 1 м и диаметром 2 мм. Характеристические температуры мартенситных переходов составляли соответственно $M_s=330$ К, $M_f=290$ К, $A_s=340$ К, $A_f=380$ К. Эффективный модуль Юнга находили двумя способами: при активной изотермической догрузке и при разгрузке. В первом случае внешнее напряжение увеличивалось от 5 до 6 МПа, а во втором – оно уменьшалось от 6 до 5 МПа. Эффективное значение модуля Юнга определяли как тангенс угла, образуемого касательной к кривой и горизонтальной осью ε , что в конечных разностях можно представить согласно выражению (1)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – изменение величины напряжения, связанное с изменением нагрузки, $\Delta\varepsilon$ – соответствующий деформационный отклик.

Основные результаты экспериментов представлены на рисунках 1–2.

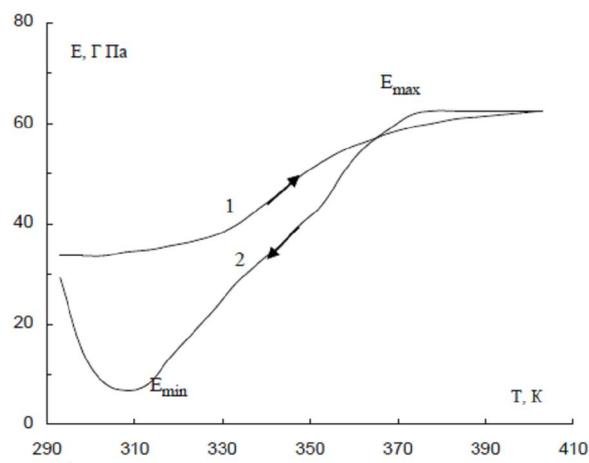


Рис. 1. Зависимость эффективного модуля Юнга, определяемого при догрузке от температуры при термоциклировании в полном интервале мартенситных переходов. Здесь и ниже стрелки обозначают направление изменения температуры.

Из рис. 1 видно, что если модуль Юнга E определять первым способом, то его величина монотонно возрастает (примерно в 2,5 раза, кривая 1) с увеличением температуры в интервале обратного мартенситного перехода. Последующее охлаждение в интервале прямого мартенситного перехода приводит к экстремальной зависимости модуля E , с достижением локального минимума при $T \approx 305 \div 308$ К. При этом его величина за такт охлаждения изменяется примерно в семь раз. Иная картина, если определять эффективный модуль Юнга при разгрузке (рис. 2). В этом случае E демонстрирует сложную экстремальную зависимость при нагревании с локальным минимумом при температуре $T \approx 332 \div 335$ К с последующим возрастанием при нагревании примерно в шесть раз. Охлаждение через интервал прямого мартенситного перехода приводит к монотонному уменьшению модуля E в интервале температур от 340 до 305 К приблизительно в два раза. Сравнение кривых на рис. 1 и 2 показывает, что при переходе от первого способа определения E ко второму кривые при нагревании и охлаждении качественно как бы меняются местами.

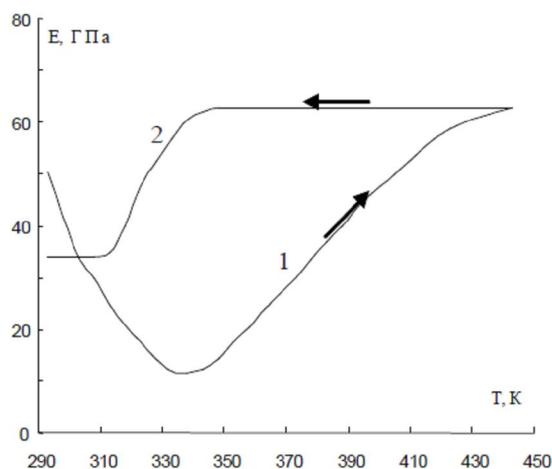


Рис. 2. Зависимость эффективного модуля Юнга, определяемого при разгрузке от температуры при термоциклировании в полном интервале мартенситных переходов.

Для численного моделирования полученных экспериментальных зависимостей предлагается использовать следующую одномерную модель мартенситной неупругости.

Дифференциал количества низкотемпературной мартенситной фазы определяется формулой

$$d\Phi = H(-dT^*) \cdot H(T^* - M_k) \cdot H(M_k + (M_n - M_k) \cdot \arccos(2 \cdot \Phi - 1) / \pi - T^*) \cdot \pi \cdot \sin(\pi \cdot (T^* - M_k) / (M_n - M_k)) / 2 \cdot (M_n - M_k) - H(dT^*) \cdot H(T^* - A_n) \cdot H(T^* - A_n - (A_k - A_n) \cdot \arccos(2 \cdot \Phi - 1) / \pi) \cdot \pi \cdot \sin(\pi \cdot (T^* - A_n) / (A_k - A_n)) / 2 \cdot (A_k - A_n) \quad (2)$$

где T^* — эффективная температура, определяемая формулой

$$T^* = T - C \cdot \sigma, \quad (3)$$

C — константа материала, T и σ — температура образца и приложенное к нему внешнее напряжение, $H(x)$ — функция Хевисайда.

Пластичность превращения имеет место, если

$$M_k \leq T^* \leq M_k + (M_n - M_k) \cdot \arccos(2 \cdot \Phi - 1) / \pi, \quad \text{при этом } \Phi \text{ изменяется от 0 до 1 при уменьшении } T^* \text{ от } M_n \text{ до } M_k.$$

Эффект памяти формы имеет место, если

$$A_n + (A_k - A_n) \cdot \arccos(2 \cdot \Phi - 1) / \pi \leq T^* \leq A_k, \quad \text{при этом } \Phi \text{ изменяется от 1 до 0 при увеличении } T^* \text{ от } A_n \text{ до } A_k.$$

Дифференциал фазовой составляющей деформации образца определяется формулой

$$d\varepsilon_\delta = K \cdot \sigma \cdot d\Phi, \quad (4)$$

где K — константа материала.

Упругую составляющую деформации учитываем обычным способом, полагая, что выполняется закон смеси фаз.

$$\varepsilon_u = \frac{\sigma}{E_m \cdot \Phi + E_a \cdot (1 - \Phi)}, \quad (5)$$

где E_m и E_a — модули Юнга мартенсита и аустенита.

Полная деформация образца вычислялась как сумма фазовой и упругой компоненты деформации

$$\varepsilon = \varepsilon_\delta + \varepsilon_u. \quad (6)$$

При численном моделировании константы принимали следующие значения: $M_n = 330$ К, $M_k = 290$ К, $A_n = 340$ К, $A_k = 380$ К. Модули упругости для мартенситной и аустенитной фаз определяли экспериментально в соответствии с формулой

лой (1), что составило $E_m = 3,3 \cdot 10^{10}$ ГПа, $E_a = 6,2 \cdot 10^{10}$ ГПа. Характеристические температуры мартенситного перехода и упругие постоянные аустенита и мартенсита были взяты из вышеприведенных экспериментальных данных. Численное значение константы $C = 3,35 \cdot 10^{-7}$ взято из экспериментальных зависимостей величин характеристических температур мартенситных переходов от напряжения, при котором осуществлялось термоциклирование [5].

Константу K находили методом последовательных приближений. В качестве исходного приближения брали значение, найденное по экспериментальным зависимостям γ от τ из работы [6], которое составило $K = 12 d\gamma/d\tau = 2 \cdot 10^{-10} \text{ МПа}^{-1}$. В качестве эталонного параметра приближения принимали величину, равную $E_{\min} = \frac{E_{\min \text{ разгр}} + E_{\min \text{ нагр}}}{2}$,

где $E_{\min \text{ разгр}}$ и $E_{\min \text{ нагр}}$ – минимальные значения экспериментального модуля Юнга, найденного при разгрузке и нагрузке. Расчетным путем определяли аналогичные характеристики $E_{\min \text{ разгр}}$ и $E_{\min \text{ нагр}}$ – минимальные расчетные значения модуля Юнга, найденные при разгрузке и нагрузке. Точно так же находили расчетную величину

$$E_{\min p} = \frac{E_{\min \text{ разгр}} + E_{\min \text{ нагр}}}{2}.$$

Приближения прекращались, когда расчетные значения удовлетворяли условию

$$\frac{E_{\min p} - E_{\min}}{E_{\min}} \leq 0,05. \quad (7)$$

Условие (7) выполнялось уже после пятой итерации при $K = 10-12 \text{ МПа}^{-1}$.

Результаты численного моделирования приведены на рисунках 3 и 4.

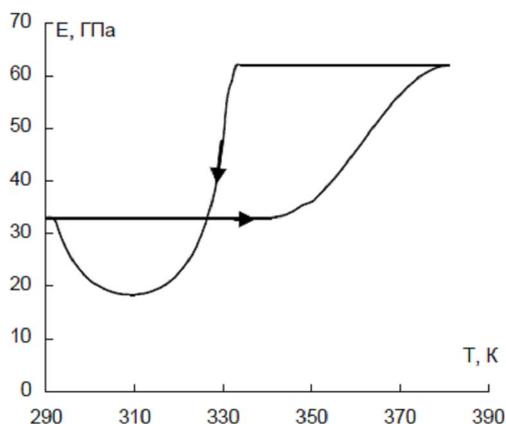


Рис. 3. Результаты численного моделирования зависимости модуля Юнга никелида титана от температуры при нагружении.

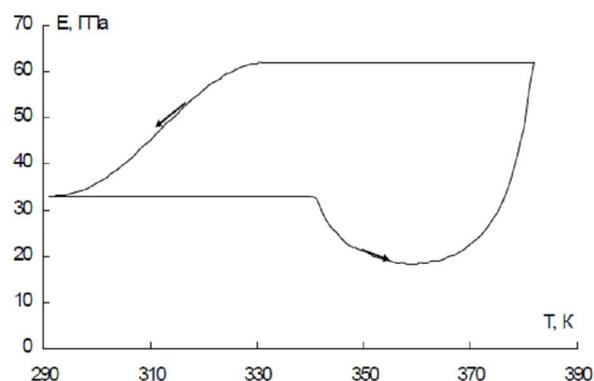


Рис. 4. Результаты численного моделирования зависимости модуля Юнга никелида титана от температуры при разгрузке.

Сравнение рисунков 1–2 и 3–4 показывает, что предложенная модель мартенситной неупругости удовлетворительно описывает зависимости упругих постоянных никелида титана от температуры. Это говорит о том, что предложенный аналитический подход может быть использован при определении эффективного модуля Юнга. Разработанная в данной статье аналитическая модель даст возможность более корректно ставить и точно решать крайевые задачи термомеханики для материалов с памятью формы. Это позволит создать математические принципы программируемого формирования требуемых функционально-механических свойств мартенситной неупругости на элементах конструкций и изделиях с памятью формы.

Литература

1. Варлимонт Х., Дилей Л. Мартенситные превращения на основе меди, серебра и золота. (Пер. с англ.). М.: Наука, 1980. 205 с.
2. Винтайкин Е.З., Удовенко В.А., Литвин Д.Ф., Серебряков В.Р. Константы упругости сплавов марганец – медь // Физика металлов и металловедение. 1980. Т. 4, №49. С. 883–885.
3. Андронов И.Н., Богданов Н.П., Тарсин А.В. Влияние характера термоциклирования и знака нагружения на величину фазовых модулей никелида титана // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 4. С.42–44.
4. Андронов И.Н., Гуревич А.С., Лихачев В.А., Недбаев П.И. Явление многократнообратимой памяти формы и реактивные напряжения в сплаве ТН-1 // (Краткое сообщение). Рубежное. Филиал Днепропетровского химико-технологического института. XXIV Всесоюзный семинар "Актуальные проблемы прочности", Механика прочности материалов с новыми функциональными свойствами. Ухта, 1990. С. 147–148.
5. Лихачев В.А., Патрикеев Ю.И. Влияние напряжения и деформации на характеристиче-

ские температуры мартенситных превращений материалов с эффектом памяти формы // Вестник ЛГУ, серия матем., механика, астрономия. № 5033-84 Деп. 1984.

6. *Андронов И.Н., Овчинников С.К., Крючков С.В.* Влияние термомеханической тренировки на поведение сплава ТН-1 в условиях проявления циклической памяти формы // Вестник Самарского государственного университета. Серия физико-математическая. 2004. С. 97–100.

Статья поступила в редакцию 05.10.2012.

УДК 622.248

ПУТИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРИЛИПАНИЯ КОМПОНОВКИ НИЗА БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ К СТЕНКЕ СКВАЖИНЫ

Ю.М. ГЕРЖБЕРГ*, В.И. КИРШИН**, А.В. КУЛИГИН**, Н.И. КУЗНЕЦОВ***, А.Н. ГОРБИКОВ***

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта

**ОАО «Газпром», г. Москва

***ООО «Газпром переработка», г. Ухта

mosyger@yandex.ru

В статье приводятся технологические решения, направленные на многократное уменьшение площади контакта компоновки с глинистой коркой. Они достигнуты путем использования промежуточных опорных элементов разной конструкции, которые имеют больший диаметр утяжеленных труб, но меньший, чем у долота. На основе расчетов напряженно-деформированного состояния компоновки в ограниченном стенками скважины пространстве, получены зависимости, определяющие размещение опорных элементов в зависимости от соотношения диаметров труб и опорных элементов, а также азимутного угла прямолинейного участка скважины.

Ключевые слова: компоновка низа бурительной колонны, прилипание, предупреждение прихвата, промежуточная опора

YU.M. GERZHBERG, V.I. KIRSHIN, A.V. KULIGIN, N.I. KUZNETSOV, A.N. GORBIKOV. PREVENTION WAYS OF BHA STICKING TO THE WALL OF WELL

We consider prevention issues of BHA sticking as a result of its sticking to the well wall. The technological decisions on repeated reduction of the area of BHA contact with a clay crust by use of intermediate basic elements of different design which have the diameter bigger than the weighted pipes, but smaller than the chisel are provided. On the basis of calculations of the intense - deformed condition of BHA in the space limited to well walls, we received the dependences defining placement of basic elements depending on a ratio of diameters of pipes and basic elements, and an azimuthal corner of a rectilinear site of well.

Key words: BHA, sticking, sticking prevention, intermediate stool

На многих площадях условия бурения скважин характеризуются сложными горно-геологическими условиями. Они способствуют возникновению таких осложнений, как прихват бурительной колонны из-за прилипания компоновки ее низа к стенке скважины. Сходные условия возникают также при бурении в условиях аномально низких давлений в первую очередь на месторождениях, находящихся в эксплуатации на площадях, где осуществляется строительство скважин для ПХГ. Помимо этого образование опасной глинистой корки (корка) происходит и при аномально высоком пластовом давлении, когда используется буровой раствор высокой плотности. Из-за опасности проявления флюидов перепад давления при этом поддерживается на значительном уровне.

На стенках скважины нередко образуется значительная по толщине корка с частицами выбуренной породы, с которой контактирует компоновка. Анализ материала, налипающего на элементы ком-

поновки, в первую очередь на калибраторы, центраторы и эксцентрические опорные элементы, показывает, что он содержит до 50% твердых вкраплений из измельченного шлама. Этому способствует наличие в разрезе значительной доли глинистых пород наряду с высокопроницаемыми отложениями. Следует отметить, что применение малоглинистых и безглинистых буровых растворов не решает полностью проблему предотвращения прилипания компоновки к стенке скважины из-за активной разработки из разбуриваемых пород коллоидных фракций.

Ранее выполненные исследования [1–4] и анализ современных данных показывают, что на площадях, где строительство скважин ведется с большими перепадами давления, ликвидация прихватов из-за прилипания компоновок обычно в 40–60 % случаев заканчивается бурением новых стволов. Расхаживание и отбивка бурительной колонны при практикуемых составах компоновок обычно не

приводит к ликвидации прихвата, за исключением операций на небольших глубинах и при малых перепадах давления. В некоторых случаях ликвидации таких прихватов способствуют установка нефтяных ванн, которые снижают адгезионные свойства среды в зоне прихвата и уменьшают перепад давления между скважиной и породой, а также применение устройств, вызывающих колебания колонны.

Процесс развивается по времени и в ряде случаев силы прихвата превышают допустимую осевую нагрузку на бурильную колонну, что не позволяет освободить прихваченный инструмент и приводит к перебуриванию больших интервалов. Известные мероприятия по предупреждению прихватов такого рода: добавки в буровой раствор смазывающих компонентов, уменьшение длины компоновки не всегда предотвращают прилипание компоновки и ее последующий прихват. Разработка решений по составу компоновки, при котором обеспечиваются ее функциональные свойства по решению трассовых задач, а также минимизируется площадь контакта труб с коркой, позволяет не только обеспечить бурение ствола в заданном направлении, но и предотвратить прихваты компоновки в сложных горно-геологических условиях.

Определение сил взаимодействия компоновки со стенкой скважины, в том числе с коркой, осуществляется путем расчета напряженно-деформированного состояния компоновки в ограничивающем пространстве, представленном слоем пластичной опоры в пределах толщины корки и жесткой опорой, которой является порода, слагающая стенки скважины. Перемещение трубы к стенке скважины определяется гравитационными силами, деформацией изгиба, а также перепадом давления между скважиной и порами породы с одной стороны, и реакцией на опорах с другой. Со временем, по мере углубления труб в корку, силы прихвата компоновки возрастают до определенного предела, но в последующем они стабилизируются. Время развития этого процесса зависит от свойств корки, геометрии компоновки, перепада давления и составляет от нескольких минут до нескольких часов. На скорость и силу прихвата компоновки влияют: длина и местоположение компоновки в момент прихвата, сечение скважины, глубина и температура на забое, зенитный угол, кривизна оси скважины, плотность, реологические свойства, водоотдача, наличие смазывающих добавок в буровом растворе.

Конструкция компоновки оказывает определяющее влияние на ее взаимодействие с коркой. Отсутствие опорно-центрирующих элементов, большая длина, малая разница диаметров скважины или выработки на ее станке и труб способствуют прилипанию компоновки. Современный опыт бурения скважин, например, на месторождениях Прикубанья (площади Прибрежная, Песчаная, Беликовская) показывает, что и при самых коротких компоновках длиной до 20 м в условиях применения утяжеленных буровых растворов (вызванного возможностью проявления пластового флюида), большого перепада давления, проницаемых пород прихват происходит в течение 8–15 мин.

Задача минимизации контакта труб с коркой и предотвращения прилипания к ней компоновки решается путем регулирования состава компоновки. В первую очередь определяются местоположение, диаметр, оптимальное число опорно-центрирующих элементов при задаваемых толщине и свойствах корки, перепаде давления между стволом и пластами пород. При этом основным требованием к компоновке остается выполнение ею трассовых функций. Выбор дополнительных опорно-центрирующих элементов (помимо инструмента для регулирования трассы скважины) осуществляется с помощью специализированной программы ЭВМ [5] для расчета компоновок низа бурильной колонны. Расчет осуществляется в два этапа:

1) на первом – производится расчет состава компоновки, обеспечивающего выполнение трассовой задачи при оптимальной массе и длине комплекта УБТ;

2) на втором этапе после определения положения одного или двух нижних центраторов с целью выполнения трассовой задачи производится уточняющий расчет размещения вспомогательных опорных элементов, предотвращающих прилегание УБТ к стенке скважины по большой длине.

На основе расчетов с помощью программы ЭВМ для заданных условий определяются все искомые данные и, в конечном счете, разрабатываются мероприятия для предупреждения прилипания компоновки к стенке скважины в конкретных условиях как по составу компоновки, так и регулированию параметров бурового раствора. Основой предлагаемых мероприятий по предупреждению прихвата вследствие прилипания компоновки к корке является размещение в ней элементов увеличенного по сравнению с трубами диаметра. В качестве таких элементов могут быть использованы центраторы или калибраторы, переводники увеличенного по сравнению с утяжеленными бурильными трубами диаметра, но существенно меньшего, чем долото диаметра.

При опасности налипания на такие элементы глинистого материала и образования сальников рекомендуется использование опорных устройств с разнесенными по длине трубы лопастями, расположенными таким образом, чтобы обеспечить центрирование утяжеленных труб. В качестве подобных опор могут использоваться «скалки» УБТ с закрепленными на них тремя или четырьмя лопастями, удаленными друг от друга на 350–400 мм и смещенными по сечению относительно друг от друга соответственно на 120° или 90° . Длина лопастей составляет 250–300 мм, по контактной поверхности – 200–250 мм. Лопастей шириной от 40 до 60 мм в зависимости от диаметра долота устанавливаются в пазах глубиной 20–25 мм, выполненных в теле утяжеленной трубы и выфрезерованных параллельно ее оси. До установки в пазы и закрепления в них сваркой эти лопасти армируются твердосплавными пластинами в пазах или круглыми вставками плоской поверхностью наружу (диаметр 10–12 мм) в шахматном порядке с шагом 35–40 мм.

Число центраторов	Введите диаметр скважины, мм	Осевая нагрузка на долото, кН	Зенитный угол на забое, град	Перепад давления скв.-пласт, МПа	Козф. статического трения
0					
1					
2	297	0	20	3	повышенный
3					средний
4					уменьшенный
5					
6					

Значение коэф. **0.25**

Введите коэф. неровности стенки скважины (< 1.0) **0.60**

№ центратора	Расстояние от долота до центратора, м	Диаметр центратора, мм
1	18	295
2	36	254
3	60	254

Контакты УБТ со стенками скважины с учетом толщины глинистой корки, м			
от	до	длина, м	площадь, м²
45.8	49.8	4.0	0.20
70.8	72.0	1.2	0.05

Продольная сила для движения УБТ, кН **87**

Расстояние от долота до последнего центратора не должно превышать 120 м

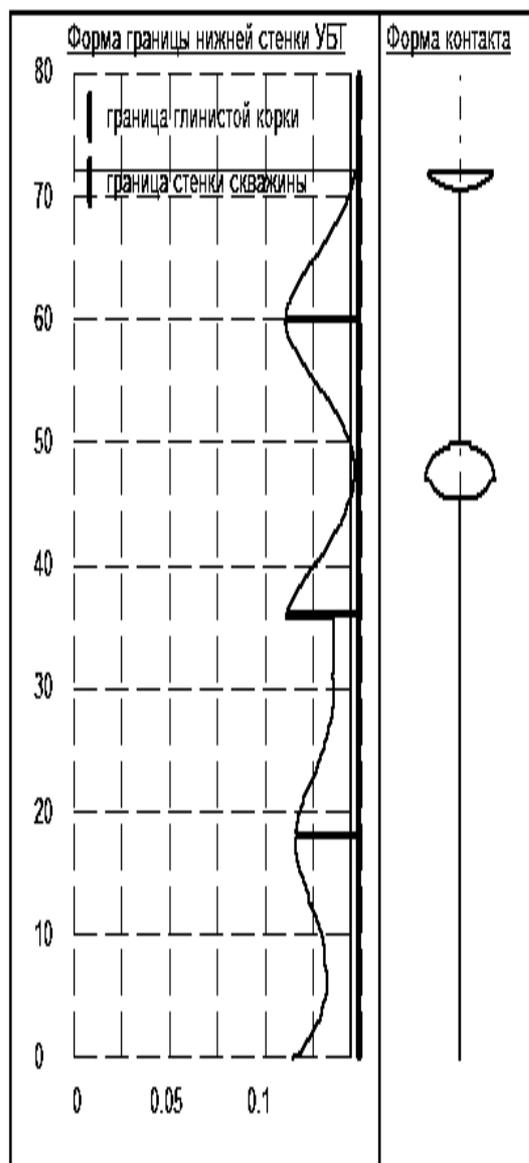
Можно изменить

Радиус кривизны оси скважины, м

скв. прямая

3. Ввод

СЧЕТ



Щелчком мыши последовательно открывайте закладки, вводите данные, нажмите кнопки ВВОД. После открытия всех закладок и ввода

Щелчком по строке таблицы можно удалить строку или заменить данные!

№ сек	Тип	Параметры	Длина, м
1	Ст. АНИ	229/89/3-171	36
2	Ст. АНИ	178/71/3-133	36

Сохранить график в папке Graphic

Рис. Результаты расчета площади контакта компоновки с глинистой коркой и сил, необходимых для ее отрыва от стенки скважины с установкой противоприхватных опор диаметром 254 мм

Техническая характеристика центрирующих устройств с разнесенными лопастями

№ п/п	Диаметр долота*	Диаметр корпуса центратора	Диаметр по лопастям	Длина трубы	Длина/ширина лопасти/их количество	Глубина паза
1	444.5	241-254	420-430	3000-3500	300/60/4	30
2	393.7		370-380		300/50/3	
3	295.3	229	270	2500-3000	270/40-45/3	20
4	215.9	178	205			

Примечание. * все линейные размеры приведены в мм.

Диаметр такого центрирующего устройства по лопастям может быть существенно (на 20–25 мм) меньше диаметра долота, что достаточно для отдаления трубы от стенки скважины на значительном расстоянии от центратора. В таблице приведены основные характеристики лопастных центрирующих устройств с разнесенными опорами. Применение подобных центрирующих устройств обеспечивает надежное удаление тела УБТ от стенки скважины на расстоянии вверх-вниз до 8–12 м (в зависимости от диаметра долота), не способствует заклиниванию компоновки на искривленных и суженных участках скважины, а также при осаднении твердого материала. Масштабное практическое использование подобных устройств, изготовленных собственными силами, осуществлялось в период 1980–1990 гг. в ПО «Ухтанефтегазгеология» Мингео СССР.

Помимо лопастных устройств в качестве опорных элементов могут быть использованы короткие (0,8–1,2 м) «скалки» УБТ увеличенного диаметра, например, 254–273 мм для долот 295,3 мм и большего диаметра. Такие устройства уменьшают вероятность налипания на опору глинистого материала со стенок скважины по сравнению с лопастными центраторами, образования сальников на них, прихвата при осыпании шлама. Для снижения скорости абразивного износа поверхности таких опор в них могут быть закреплены вставки из твердосплавного материала.

Работоспособность опоры поддерживается путем перенарезки резьбы через определенное время. Суммарный ресурс по времени работы опоры для периодически перенарезаемых резьбовых соединений и сокращения длины опоры и износа его корпуса по диаметру в большинстве условий бурения близок.

На рисунке в качестве примера приведены результаты расчета оптимального размещения противприхватных элементов в роторных компоновках для долот 295,3 мм с компоновкой длиной 72 м при зенитном угле 20°. Для облегчения отрыва компоновки от стенки путем воздействия волновыми методами в случае прихвата на ее конце рекомендуется устанавливать центратор, противодействующий затаскиванию компоновки в желоб.

Обработка многочисленных результатов расчетов размещения опорных элементов для предотвращения прилипания компоновки позволила получить зависимость рекомендуемого расстояния L

между ними в зависимости от соотношения диаметров УБТ и опорных устройств, зенитного угла в прямолинейном стволе скважины:

$$L = 2,32 \cdot 10^2 - 6,95 \cdot 10^2 \cdot D^2 + 5,42 \cdot 10^7 \cdot d^{-3} + 39,2 \alpha^{-0,4},$$

где D и d – диаметр соответственно опорного элемента и УБТ, мм; α – зенитный угол на рассматриваемом участке скважины, градус.

Приведенная формула соответствует толщине корки 5 мм. В случае отличия толщины корки от этого значения изменяют диаметр опорного элемента на удвоенную разность значений эталонной (5 мм) и рассчитываемой толщины корки. Например, при фактической толщине корки 3 мм диаметр опорного элемента принимают на 4 мм больше, при фактической толщине корки 6 мм – на 2 мм меньше. Диапазон рассматриваемых условий: диаметр долота от 215,9 до 444,5 мм, зенитный угол от 1 до 30°.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) применение нескольких (3–4) опорных элементов позволяет многократно уменьшить вероятность прилипания компоновки в зоне залегания проницаемых пород;

2) диаметр опорных элементов может быть существенно меньше диаметра долота, но больше диаметра УБТ не менее чем на 15–25 мм;

3) в качестве опорных элементов могут использоваться как центраторы меньшего диаметра, чем долото, так и изготовленные из труб квадратного сечения детали или УБТ большего диаметра, чем используемые в компоновке;

4) рациональное размещение таких опор определяется путем расчета на ЭВМ с учетом диаметра скважины, толщины корки, состава компоновки, радиуса кривизны и зенитного угла скважины;

5) отсутствие опорных устройств в компоновке может привести к прилипанию труб, которое невозможно освободить без обрыва буровой колонны, вместе с тем большое число таких устройств и приближение их диаметра к диаметру долота увеличивают опасность прихвата при оседании шлама и породы в случае прекращения промывки;

6) для отдаления верхнего конца компоновки от глинистой корки, существенного повышения эффективности волновых методов освобождения буровой колонны от прихвата полезным мероприятием является установка на верхнем конце компоновки переводника увеличенного диаметра или центратора, препятствующего также затаскиванию ее в желобную выработку.

Литература

1. *Самоной А.К.* Прихваты колонн при бурении скважин. М.: Недра, 1984. 207 с.
2. *Шерстнев Н.М.* Предупреждение и ликвидация осложнений в бурении. М.: Недра, 1979. 304 с.

3. *Александров М.М.* Взаимодействие колонны труб со стенками скважины. М.: Недра, 1982. 144 с.
4. *Пустовойтенко И.П.* Предупреждение и методы ликвидации аварий и осложнений в бурении. М.: Недра, 1987. 237 с.
5. *Гержберг Ю.М., Чарков В.Д.* ФС по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2006610567 от 09.02.2006. Программный комплекс для проверочного расчета состава бурильной колонны (Prov_Bur_Kol).

Статья поступила в редакцию 30.07.2012.

УДК 94339.3:336.1.07(470.13)"17"

ФУНКЦИИ ВНУТРЕННИХ ТАМОЖЕННЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ В РОССИИ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XVIII ВЕКА (ПО МАТЕРИАЛАМ КОМИ КРАЯ)

Т.В.ПАВЛИНА

Сыктывкарская таможня, г. Сыктывкар
tatyana_pavlina@mail.ru

В статье на материалах Яренского и Пустозерского уездов Архангелогородской губернии охарактеризованы функции российских внутренних таможенных учреждений в первой половине XVIII в., выявлена специфика их деятельности на территории Коми края в эпоху, предшествующую отмене внутренних таможен.

Ключевые слова: Коми край, таможенное дело, внутренние таможи, функции таможенных учреждений

T.V. PAVLINA. FUNCTIONS OF INTERNAL CUSTOMS OFFICES IN RUSSIA IN THE FIRST HALF OF XVIII CENTURY (ON MATERIALS OF THE KOMI TERRITORY)

On materials of Yarensky and Pustozersky Districts of Arhangelogorodsky Province functions of the Russian internal customs offices in the first half of XVIII century are characterized, specificity of their activity in the Komi territory in epoch preceding abolition of internal customs is revealed.

Key words: Komi territory, customs business, internal customs, functions of customs offices

Ярко описал круг обязанностей служащих российских внутренних таможен в дореволюционный период историк И.С.Макаров: «Привлечь к уплате пошлин укrywавшийся... торг на каком-нибудь съезде крестьян у храмового праздника, застигнуть возы с товаром на волоке при переправе из одной реки в другую, наконец, вовремя собрать тамгу и мыт с торговца-одиночки – всюду должен был поспеть зоркий глаз головы и его агентов-целовальников» [1, с.199–200].

Однако, правдиво отражая реалии XVII столетия, по отношению к последующей эпохе в истории таможенного дела России такой взгляд представляется уже несколько упрощенным. Указы и инструкции первой половины XVIII в. обязывали служащих внутренних таможен «во всем... государственную пользу тщательнее остерегать...» [2], что означало на практике выполнение целого комплекса разноплановых функций.

К сожалению, функционал этот не был до сих пор предметом специального исследования. Лишь отдельные моменты, касающиеся содержания деятельности российских таможенных учреждений в первой половине XVIII в., получили освещение в работах Н.В. Козловой [3], Т.С. Минаевой [4], С.М. Троицкого [5].

Между тем без понимания данного вопроса не будет полным наше представление о механизме реализации таможенной политики России в эпоху, предшествующую отмене внутренних таможен.

Руководствуясь идеей о «безубыточности» таможенных сборов для государства и «бестягостности» их для населения, абсолютная монархия стремилась в этот период максимально задействовать в своих целях потенциал таможенной системы. К середине XVIII в. доходы от нее обеспечивали около трети казенных поступлений. [5, с.53, 178, 214]. Наряду с традиционной фискальной составляющей правительством привлекались и ранее не использовавшиеся таможенные ресурсы, что придавало таможенной деятельности в «век торговли» [6, с.59] новые акценты.

Проиллюстрировать сказанное помогут относящиеся к первой половине XVIII в. материалы делопроизводства внутренних таможен, действовавших на территории Коми края, основную часть которого в означенный период составляли Пустозерский и Яренский уезды Архангелогородской губернии и курировавших их деятельность воеводских канцелярий.

Речь идет о таможнях, действовавших в административных центрах названных уездов (Ярен-

ская и Пустозерская) и развитых в торговом отношении населенных пунктах (Усть-Сысольская, Усть-Цилемская, Ижемская). Основной их функцией являлось таможенное обложение производимых на подведомственной территории торговых сделок по закупке местной продукции (рыба, меха, «земские товары») и реализации привозных товаров. Выполнение ее в означенный период характеризовалось возрастанием объемов и сложности таможенных операций в связи с увеличением в рассматриваемом регионе масштабов торговли [7, с.187–192], а также расширением действовавшей системы таможенного обложения. (При Петре I были восстановлены упраздненные в середине XVII в. проезжие и мелочные сборы, введены новые пошлины, повышены ставки по отдельным сборам).

Так, помимо предусмотренных Торговым уставом 1653 г. таможенных пошлин (рублевая, десятая, перекупная, весчее) в рассматриваемый период в таможах взимались «привальное» и «отвальное», «с найму извозчиков», «на расходы» Военной коллегии, «вновьприбавочная» пошлина и др. Заметим, что по некоторым из них действовал весьма усложненный порядок расчета. «Вновьприбавочная» пошлина, к примеру, исчислялась в процентах от суммы, подлежащей уплате за товар рублевой, десятой, весчей и перекупной пошлин, каждая из которых также рассчитывалась по своей ставке.

Все произведенные по каждой торговой сделке таможенные операции (досмотр, «взятье пошлин», выдача и регистрация таможенной выписи, «отпуск») фиксировались в соответствующей таможенной книге. В начале 40-х гг. XVIII в. в Яренской таможе велось 18 книг по различным категориям товаров: «Явчая китайским и сибирским товарам и в ней досмотр», «Отпускная Яренска города жителям лавочной покупки», «Записная оборотным платежным выписям» и др. [8].

Любопытно, что при проведении таможенного контроля служащие таможен, помимо прочего, обязывались «в проезде купецким людям напрасно задержания не чинить..., но... от обидящих их защищать под опасением немалого штрафа». Особое покровительство при этом следовало оказывать иногородним торговцам, прибывающим «для покупки каких товаров» [9] и обеспечивавшим наибольшие поступления в таможенную казну.

«Всеприлежное радение и смотрение» требовалось иметь не только в таможенном сборе. Традиционно сопровождал его в описываемом регионе кабацкий сбор от продажи «казенных питей» [10]. В Яренске, Пустозерске, Усть-Сысольске, Ижме, Усть-Цильме при таможах функционировали кружечные дворы с кабацкими избами и подведомственные им стойки винной продажи в волостях. При Усть-Сысольском кружечном дворе, например, действовала 21 винная стойка, через которую только в 1733 г. было реализовано населению 910 ведер вина на 1330,5 руб. [11, с.267].

Напитки продавались оптом (в ведра, полуведра и четверти) и на разлив в «крушки» и чарки. При этом в казну взимались с записью в специальные книги (в в Яренской таможе, например, ве-

лось восемь таких книг) особые кабацкие сборы: «истинные» и «прибыльные» – с цены напитков, «поведерные» и «накладные» – с их количества. Помимо выполнения указанных операций, служащие таможен должны были организовать изготовление, доставку и хранение напитков. В расходной книге Яренской таможи 1741 г. зафиксированы расходы на приобретение дров, посуды («тчанов», корыт) и припасов (солода, хмеля, дрожжей) на «пивное варение», на оплату услуг по «варению пива», доставке подрядного вина от Устюга и Лальска до Яренска и пр. Все эти затраты с лихвой окупались: сумма питейной прибыли в Яренской таможе в этом году в 7,5 раз превышала таможенный сбор [12]. Аналогично обстояли дела по этой части и в других таможах рассматриваемого региона [13].

Помимо «питей», таможи в описываемое время торговали от казны и иными товарами. Так, до объявления «вольного торгу» табаком в Усть-Сысольской таможе осуществлялась «табашная» продажа. В 1707 г. сбор от нее составил 30 руб. В Усть-Цилемской таможе велась «картяная» продажа для посетителей кружечного двора. В частности, в 1730 г. здесь имелась в продаже «одна дюжина 4 игр» игральные карты [14].

В подотчетности таможен находились и иные направления хозяйственной деятельности. В Яренской таможе по итогам года производился расчет с приказчиками Сереговского соляного промысла по уплате пошлин за продажу соли «в Еренску» и Туглиме, взимались установленные оклады с посадских мясников и «мелочников» [15]. В Пустозерской таможе осуществлялся сбор оброчных денег «с крестьян рыбных ловель», «с сенных покосов» и ветряных мельниц [16].

Обширное поле деятельности таможен и налаженная система учета ее результатов не могли остаться без внимания правительства, заинтересованного в повышении уровня своей информированности о состоянии дел в различных сферах. Приспешившее его внимание к значимой для казны торговой сфере дало толчок развитию национальной таможенной статистики. С 40-х гг. XVIII в. в России начали составляться ведомости о внешней торговле [17, с.41]. Для оценки состояния дел во внутренней торговле практиковались запросы у внутренних таможен различных данных, характеризующих эту сферу на местах.

В частности, по одному из таких запросов Яренская и Усть-Сысольская таможи ежемесячно информировали в 1741 г. Яренскую воеводскую канцелярию «о хлебных ценах и других припасах» на уездных торжках [18].

Запрашиваемые у таможен сведения не всегда ограничивались рамками торговли, в чем убеждает указ «о посылке ведомостей за 740 год», адресованный надзирателю Пустозерской таможи. Помимо цен на товары, «кои в провинциях роятся и делаютца», в ведомостях следовало подробно описать, как уродились «в последней оною года жатве» зерновые и бобовые культуры, лен, пенька и корм, «подлежащей скотине», каковы они длиною

и «крепостию», в достаточном ли количестве этого имеется. Необходимо было указать, с прибылью или с убытком работали кожевенные, юфтяные, сальные фабрики, «удались ли» пчелиные заводы и рыбный промысел, не претерпели ли повреждения от «незапного пожару, потопления, сильных бурь и других несчастливых случаев» «купетские» товары. Издателей указа интересовало, кроме того, состояние путей сообщения и даже погода на предмет того, можно ли в таких условиях «товары к надлежащим пристаням бес препятствия привозить».

Устанавливая жесткие сроки представления столь обширной информации («с получения указа на другой день» и впредь «по прошествии каждого года») [19], издатели рассчитывали на высокий уровень информированности руководителя таможенной о состоянии дел в экономике подведомственного региона.

Впрочем, гораздо чаще властям требовалась от таможен их текущая отчетность по основной деятельности, существенно расширенная и детально регламентированная в описываемое время. «По прошествии каждой трети и месяца в первый день», а также по итогам года в воеводские канцелярии следовало направлять «репорты по посланным формам», с приложением собранной денежной казны и подробных ведомостей о ее «приходе, расходе и остатке». По запросам правительственных учреждений готовились и сводные отчеты о результатах работы за ряд лет с указанием недоборов и их причин. Сохранилась такая ведомость за период с 1730 по 1741 гг. по Яренской таможене, позволяющая оценить ее деятельность в динамике [20].

Отчетность должна была предоставляться «в указной термин», а то и «в самой крайней скорости». «Неприсылка» в срок грозила «взятыем немалого штрафа» даже при наличии объективных причин. Так, не были приняты во внимание в свое время доводы таможенного бурмистра Г.Попова, объяснившего задержку в присылке ведомости Яренской таможене «к сочинению окладной книги с 725 по 738 год», отсутствием в таможене «прежних» таможенных книг. Трехлетняя история, сопровождавшаяся неоднократной присылкой в Яренск «для взятия» ведомости «нарочных салдат и разсылщиков», завершилась представлением в июне 1741 г. требуемого документа и... взысканием с Яренской таможен 15 руб. в пользу лиц, присылавшихся «для понуждения в отправлении ведомостей» [21].

Документация таможен, фиксирующая факты юридической значимости, использовалась властями и не в таможенных целях. В частности, ведомости той же Яренской таможен позволяли служащим Сибирского приказа выявлять нарушителей царского запрета на перемещения через Собскую заставу в связи с закрытием в 1704 г. древнего «чрезкаменного» пути [22].

Важно отметить еще одну выполняемую таможенными в рассматриваемом регионе функцию, которая, с учетом его специфики (удаленность от центра, место ссылки) представляется жизненно важной. Обладая необходимой наличностью, тамо-

женные учреждения производили оплату различных государственных расходов, в том числе не связанных с таможенной деятельностью. Так, согласно ведомости за 1734 г. из доходов Пустозерской таможен было выдано на выплату «кормовых» ссыльным, «на прогоны подколотников и посланных с нужнейшими доношениями и ведомостями» в Архангельск, на покупку провизии, оленьих снастей и корма казенным оленям, а также «в награждение» пустозерским обывателям, «самоядский язык знающим», 249 руб. 15,5 коп. [23].

Из доходов таможен оплачивались в означенный период содержание, ремонт и аренда помещений для таможенных и кабацких целей, а также постройка и покупка новых таможенных изб в Усть-Сысольске (1703 г.), Пустозерске и Усть-Цильме (1731 г.), «пивоварной поварни» на кружечном дворе в Яренске (1741 г.) [24]. Обязанности по надлежащему «смотрению» за «казенными строениями» и своевременному информированию властей об их починке или постройке, «ежели потребно будет», также возлагались на таможенных служащих [25].

Не оплачивалось из казны лишь выполнение всех этих названных выше функций, которые для служащих внутренних таможенных учреждений (в отличие от их коллег в пограничных и портовых таможен, получавших с 1724 г. фиксированное жалованье) оставались, как и в предыдущем столетии, по сути, феодальной повинностью.

Литература

1. Макаров И.С. Волостные торжки в Сольвычегодском уезде в первой половине XVII в. // Исторические записки. Т.1. АН СССР. Ин-т истории / Отв.ред. акад. Н.М.Лукин. М., 1937. С.193–219.
2. Российский государственный архив древних актов (далее – РГАДА). Ф.609. Оп.3. Д.19. Л.1об., 3 об.
3. Козлова Н.В. Российский абсолютизм и купечество в XVIII в. (20-е–начало 60-х гг.). М.: Археографический центр, 1999. 384 с.
4. Минаева Т.С. Россия и Швеция в XVIII в.: история таможенной политики и таможенной системы. Архангельск: Поморский университет, 2009. 190 с.
5. Троицкий С.М. Финансовая политика русского абсолютизма в XVIII в. М.: Наука, 1966. 275 с.
6. Маркс К., Энгельс Ф. Сочинения. 2-е изд. Т.3.
7. Павлова Т.В. Торговые связи Коми края в 20–40-е гг. XVIII в. (по материалам таможенного делопроизводства) // Торговля, купечество и таможенное дело в России в XVI–XIX вв.: сб. материалов Второй междунар. науч. конф. (Курск, 2009) / сост. А.И.Раздорский. Курск, 2009. С.187–192.
8. РГАДА. Ф.829. Оп.1. Д.1983. Л.4об–5об.
9. РГАДА. Ф.829. Оп.1. Д.1502. Л.18 об.
10. РГАДА. Ф.829. Оп.1. Д.1504. Л.1об, 27; Д.1506. Л.4.
11. История Коми с древнейших времен до конца XX в. Т.1. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 2004. 560 с.

12. РГАДА. Ф.829. Оп.1. Д.1983. Л.4об–5об; Д.1982. Л.1об–26.
13. РГАДА. Ф.609. Оп.3, Д.52. Л.1-9; Д.57. Л.18об–61; Ф.829. Оп.1, Д.1818. Л.15, 33.
14. РГАДА. Ф.829. Оп.1, Д.1818. Л.17об; Ф.350. Оп.1. Д.477. Л.2.
15. РГАДА. Ф.273. Д.32879. Л.69 об–70; Д.32880. Л.68об–69.
16. Государственный архив Архангельской области (далее ГААО). Ф.1. Оп.1. Д.1597. Л.5.
17. Таможенное дело в России X – начало XX в. (Исторический очерк. Документы. Материалы). СПб.: ПиК, 1995. 213 с.
18. РГАДА. Ф.609. Оп.3, Д.11. Л.48–49.
19. РГАДА. Ф.829. Оп.1, Д.1502. Л.6-6об.
20. РГАДА. Ф.609. Оп.3. Д.12. Л.1-9; Д.19. Л.3-3об; Д.37. Л.31об–32; Д.57. Л.18 об–19 об; Ф.829. Оп.1, Д.1504. Л.27; Д.1972. Л.1-35; Д.1975. Л.2–163.
21. РГАДА. Ф.829. Оп.1, Д.1975. Л.73-74об, 77, 97.
22. Национальный архив Республики Коми. Ф.286. Оп.1. Т.1. Д.99. № 38. Л.40–41.
23. ГААО. Ф.1. Оп.1. Д.1597. Л.22 об–24.
24. РГАДА. Ф.273. Оп.1. Д.32879. Л.70–72об; Д.32880. Л.69-71; Ф.350. Оп.1. Д.477. Л.3; Ф.829. Оп.1, Д.1500. Л.43–44; Д.1504. Л.1; Д.1982. Л.1об–23об.
25. РГАДА. Ф.829. Оп.1. Д.1502. Л.18 об.

Статья поступила в редакцию 22.04.2013.

УДК 811.511.13

К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПЕРМСКОЙ ЭТИМОЛОГИИ

В.В. ПОНАРЯДОВ

Институт языка, литературы и истории Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
vadim.ponaryadov@yandex.ru

Статья посвящена анализу современного состояния пермских этимологических исследований и постановке приоритетных задач для будущего их развития.

Ключевые слова: пермские языки, этимология

V.V. PONARYADOV. TOWARDS IMPROVING PERMIC ETYMOLOGY

The analysis of the current state of Permic etymological researches is given and priority problems for future etymological investigations in Permic studies are set.

Key words: the Permic languages, etymology

Пермская и особенно коми этимология имеют давнюю традицию научной разработки, и в этой области достигнуты значительные успехи. Не будет преувеличением сказать, что из всех финно-угорских языков России пермские являются ныне этимологически наиболее изученными. Появившийся в 1970 г. «Краткий этимологический словарь коми языка» В.И. Лыткина и Е.С. Гуляева [1] вот уже 40 лет не только верой и правдой служит финно-угроведам благодаря неплохому (несмотря на декларированную в названии «краткость») охвату лексического материала, взвешенности суждений, а также, не в последнюю очередь, удачному построению. Он широко привлекается как источник уральского лексического материала лингвистами других направлений. Начал издаваться многотомный удмуртский этимологический словарь [2]. Важное место занимают пермские материалы и в общих работах по уральской исторической лексикологии, среди которых прежде всего следует упомянуть «Уральский этимологический словарь» К. Редеев [3].

В то же время внимательное рассмотрение содержащихся в стандартных работах и потому часто являющихся объектом вторичного цитирования пермских этимологий показывает, что не все они одинаково надежны. Кроме того, значительная часть пермской лексики остается до сих пор этимологически не объясненной. Таким образом, при всех своих достижениях пермская этимология нуждается в совершенствовании. Рассмотрим ее слабые места подробнее.

Наиболее системный характер имеют случаи недостаточной объяснительной силы праязыковых реконструкций, возникающие из-за несовершенств разработки пермской и, шире, финно-угорской исторической фонетики, особенно вокализма. Показательным примером может быть одинаковая реконструкция прафинно-угорских архетипов слов 'стре-

ла' и 'лизать' как **hōle* [1, с. 197, 199; 3, S. 317, 321], хотя одинаковый гласный в этих словах обнаруживают лишь прибалтийско-финские языки (фин. *nuoli, nuolla*), а в пермских, волжских и угорских вокализм различен (коми *ньōв, нювны*; эрзя *нал, ноламс*; венг. *nyil, nyalni*). Ясно, что в подобных случаях коррекции требует не только восстановление облика конкретных архетипов, но и вообще вся принятая в современном финно-угроведении теория праязыкового вокализма. Следует отметить, что П. Саммаллахти, различающий разные хронологические уровни праязыковой реконструкции, на основе самодийских соответствий предлагает здесь для прауральского реконструкции с разными гласными **hixli* и **hāxli*, но досадным образом на этом останавливается и, вопреки фактам, для прафинно-пермского традиционно предполагает в обоих случаях совпадение в **hooli* [4, p. 539].

Особые проблемы связаны с прапермской вокалической реконструкцией, существующей ныне в нескольких вариантах, общей чертой которых является многочисленность реконструируемых прафонем и малая типологическая правдоподобность при неспособности в то же время объяснить все наблюдающиеся межпермские звукосоответствия. Нужно отметить, что все современные прапермские реконструкции традиционно «комичесентричны». Это выражается, например, в том, что с опорой на коми материал реконструируются противопоставления открытых и закрытых гласных среднего подъема, которые не обнаруживают никаких следов различия в удмуртской ветви, но в то же время во многом похожее распределение удмуртских *e* и *o* на месте коми *e* (исторически как открытого, так и закрытого) не находит отражения в прапермской реконструкции, объясняясь через спорадическое «расщепление». Недавно М.А. Живлов показал, что открытость и закрытость пракоми гласных на самом деле

может быть объяснена в большинстве случаев фонетическим окружением, и лишь перед непалатализованными взрывными, носовыми и *r их распределение комбинаторно непредсказуемо [5]. Это может указывать на вторичное происхождение противопоставления по открытости/закрытости. С другой стороны, В.В. Понарядов продемонстрировал позиционно обусловленный характер появления удмуртских гласных а и у в соответствии с коми а, что позволяет отказаться от реконструкции особой фонемы *â в пермском праязыке [6]. Таким образом, появляются перспективы сокращения прапермского инвентаря гласных фонем, что должно привести реконструируемую вокалическую систему к большому типологическому равновесию.

Что касается отдельных этимологий, то в некоторых случаях стандартные руководства предлагают явно ошибочные решения, которые, тем не менее, продолжают повторяться из работы в работу. Особенно опасны случаи, когда сопоставляются действительно семантически и фонетически похожие слова, но при этом грубейшим образом нарушается основополагающий для сравнительно-исторического языкознания принцип регулярности фонетических соответствий. Показательным примером является повторяющееся во многих работах сопоставление коми са, удм. су 'сажа' с мар. шўч, морд. сод 'то же' [1, с. 248; 3, S. 769]. Полное совпадение семантики не должно затушевывать того факта, что фонетическое сходство этих слов не укладывается ни в какую регулярную систему: гласные коми а, удм. у обычно не могут соответствовать морд. о, а согласный мар. ч нормально не является соответствием пермского нуля и морд. д. Очевидно, для коми са, удм. су следует ожидать те же марийские и мордовские фонетические соответствия, что и в других словах аналогичной фонетической структуры, например, коми ва, удм. ву 'вода', коми ма, удм. му 'мед'. Последним словам родственны мар. вўд, мўй и морд. ведь, медь. Легко вычислить, что коми са, удм. су требуют соответствий мар. *шўд или *шўй и морд. *седь. И действительно, в словарях находим мар. шўй и морд. седь 'уголь', которые, очевидно, и должны быть признаны реальными когнатами пермских слов вместо указываемых в словарях шўч и сод, этимологическая связь которых с пермскими словами оказывается ошибочной.

Коми вом, удм. ым 'рот' посредством сопоставления с формами типа мар. ан 'отверстие', саам. vuolâs 'намордник', нган. ъааѭ 'рот' часто возводят к общему прауральскому архетипу *aŋe [1, с. 62; 3, S. 11]. Однако допермский заднеязычный носовой согласный *ŋ в южноудмуртских диалектах нормально всегда сохраняется, а в других диалектах удмуртского и коми языков дает перебой м ~ н, в то время как в рассматриваемом слове пермских языков во всех диалектах стабильно представлен только м. Кроме того, коми-удмуртское вокалическое соответствие указывает на прапермский гласный *ô, который нормально восходит только к допермским гласным переднего ряда, чаще всего к *e. Таким образом, пермское слово не может происхо-

дить из *aŋe ни с точки зрения консонантизма, ни с точки зрения вокализма. Наиболее вероятным образом его допермский источник мог выглядеть как *eme. Возможно, далее эту форму следует этимологически увязывать с прауральским архетипом *ime- 'сосать' [3, S. 82], рефлексy которого широко представлены в прибалтийско-финских, угорских и самодийских языках. Хотя определенные сложности с вокализмом при таком сопоставлении еще остаются, они явно меньше, чем в случае возведения к *aŋe. Проблемы же с консонантизмом в предлагаемом решении исчезают полностью.

Иногда необычность фонетических соответствий заставляет подозревать, что определенное слово не унаследовано напрямую из праязыка, а является заимствованием из какого-то близкородственного idioma. Так, удм. лым 'бульон' связано с родственными лексемами фин. liemi, морд. лем, мар. лем совершенно регулярными вокалическими корреспонденциями, но предположительно этимологически относящееся сюда же коми диал. лем 'студенистый, застывший навар (напр. рыбный, мясной)' фонетически совершенно аномально. Существует версия о деформации этого коми слова под влиянием восходящей к другому допермскому источнику лексемы лем 'клей' [1, с. 159]. Однако следует считать также с возможностью раннего марийского или мордовского заимствования. Подобные случаи, остающиеся пока совершенно неизученными, настоятельно требуют отдельного выявления и систематизации.

В некоторых случаях этимологические слова неоправданно разводят по разным словарным статьям единые по происхождению лексемы. Едва ли правомерно, например, кочующее по разным работам генетическое отделение коми существительного дор 'край, сторона' от имени-последлога дор 'место возле, около чего-л.' [1, с. 95; 3, S. 512, 795]. Более сложный пример подобного рода представляют собой отношения между коми кабыр 'кулак, горсть' и (засвидетельствованным в словаре Ф.И. Видеманна [7, S. 92], но отсутствующим в более современных лексикологических источниках) камыр 'горсть'. Первое слово К. Редеев возводит вместе с фин. koura к праформе *kopra, а второе – вместе с саам. goabmer, морд. коморо, комор к архетипу *komз(рз) [3, S. 175, 183]. Вероятно, на самом деле в обоих случаях имеют место продолжения единого прауральского источника, который мог выглядеть как *komrз. Между двумя сонорными имел тенденцию факультативно появляться эпентетический взрывной согласный *b, так что в коми кабыр сочетание *-mb- в соответствии с регулярной закономерностью претерпевало деназализацию, а в финском koura согласный *-m- выпадал в связи с запретом на трехсогласные кластеры. Одновременно продолжала существовать форма без эпентезы, которая и дает рефлексy типа коми камыр, морд. коморо.

Несомненно необходима необходимость расширения этимологического охвата пермского материала. По нашим подсчетам, только две трети потенциально нуждающейся в этимологизации лексики коми ли-

тературного языка охвачено этимологическими словарями. В удмуртском языке, серийное издание этимологического словаря которого прервалось после выпуска первого тома [2], историческая исследованность словарного состава гораздо хуже. Совершенно недостаточно разработана лексика коми и удмуртских диалектов, не имеющая соответствий в литературных языках.

Во многих случаях возможно углубление этимологической разработки отдельных лексем. Так, коми *кок*, удм. *кук* 'нога' возводится исследователями на прапермский уровень [1, с. 129], но более ранняя история этого слова, несмотря на его важное положение в системе пермских соматических названий, остается непроясненной. В.И. Абаев отмечает сходство коми слова с осет. *къах* 'нога'. Таким образом, оно может оказаться еще одним пермским иранизмом. Однако проблема осложняется тем, что осетинское слово в иранских языках изолировано, но находит параллели в соседних горских языках Кавказа, ср. чечен., ингуш. *ког*, даргин. *къаиш* 'то же' и др., откуда скорее всего и заимствовано [8, с. 619]. Поэтому вопрос требует дальнейшего изучения.

Новой ревизии требует контактная лексика, связывающая пермские языки с чувашским. Повидимому, этот пласт выявлен далеко не полностью, но, кроме того, даже среди уже известных схождений многие слова, рассматривающиеся в пермистике как чувашизмы (или, в другой терминологии, болгаризмы), парадоксальным образом не имеют тюркской этимологии и, таким образом, сложно признать их в чувашском языке и близкородственных ему древних болгарских диалектах исконными. Более того, часть подобных слов считается в чувашских этимологических словарях [9; 10] заимствованной из пермских языков. Если для пермских слов альтернативно предлагаются, наряду с версиями о болгарском заимствовании, финно-угорские этимологии, то при отсутствии тюркских этимологий у их чувашских коррелятов именно финно-угорское происхождение должно считаться более вероятным. Однако нередко общая чувашско-пермская лексика не может быть удовлетворительно выведена ни из тюркских, ни из финно-угорских источников. Возможно, здесь мы имеем дело с древним субстратным наследием палеоевразийских языков, распространенных в Волго-Камье еще до появления в этом регионе не только тюрков, но и финно-угров. Даже тогда есть шансы путем исследования сохранившейся в чувашском и пермских (а также других поволжских финно-угорских языках) субстратной лексики установить генетическую связь ее источника (или источников) с

какими-то иными языками, и развитие работ в этом направлении представляется крайне желательным.

Итак, несмотря на достигнутые успехи, пермская этимология ныне пребывает в далеко не удовлетворительном состоянии. Требуют уточнения как основополагающие для нее элементы реконструкции прафинно-пермской и прапермской фонетических систем, так и в ряде случаев частные этимологические решения при исследовании истории отдельных слов. Также необходимо расширение корпуса этимологизируемой лексики. Только интенсификация исследований в указанных направлениях позволит пермской этимологии сохранить передовые позиции, которые она занимает в мировом финноугроведении.

Литература

1. *Лыткин В.И., Гуляев Е.С.* Краткий этимологический словарь коми языка. М.: Наука, 1970.
2. *Алатырев В.И.* Этимологический словарь удмуртского языка. Буквы А, Б. Ижевск: НИИ при СМ УАССР, 1988.
3. *Rédei K.* Uralisches etymologisches Wörterbuch. Budapest: Akadémiai Kiady, 1988.
4. *Sammallahti P.* Historical phonology of the Uralic languages // Sinor D. (ed.) The Uralic Languages. Description, History and Foreign Influences. Leiden: Brill, 1988. P. 478-554.
5. *Zhivlov M.* Studies in Uralic vocalism I: A more economical solution for the reconstruction of the Proto-Permic vowel system // J. Language Relationship. 2010. 4. P. 167-176.
6. *Понарядов В.В.* Некоторые вопросы истории пермского вокализма // *Динамические процессы в системах пермских языков* (Труды Института языка, литературы и истории Коми НЦ УрО РАН; Вып. 68). Сыктывкар, 2011. С. 63-70.
7. *Wiedemann F.J.* Syrjänisch-deutsches Wörterbuch nebst einem wotjakisch-deutschen im Anhang und einem deutschen Register. St. Petersburg, 1880.
8. *Абаев В.И.* Историко-этимологический словарь осетинского языка. Т. 1. А – К'. М.; Л.: Издательство АН СССР, 1958.
9. *Егоров В.Г.* Этимологический словарь чувашского языка. Чебоксары: Чувашское книжное издательство, 1964.
10. *Федотов М.Р.* Этимологический словарь чувашского языка. В 2-х тт. Т. 1. А – Р. Т. 2. С – Я. Чебоксары: Чувашский государственный институт гуманитарных наук, 1996.

Статья поступила в редакцию 08.06.2012.

УДК 398 (=945.32)

ИСТОРИЗМ ФОЛЬКЛОРА VS ФОЛЬКЛОРИЗМ ИСТОРИИ: СЮЖЕТ ОБ УБИЙСТВЕ КНЯЗЯ ВАСИЛИЯ ВЫМСКОГО

А.В. ПАНИУКОВ

Институт языка, литературы и истории Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
arankomisc@mail.ru

Статья посвящена частному аспекту темы «история как текст – текст как история». Анализируя сюжет об убийстве князя Василия Вымского (1480 г.), автор показывает, как в результате сложного, нелинейного взаимодействия устных и письменных нарративов возникает квазиисторическая реальность.

Ключевые слова: коми-зыряне, традиционная культура, фольклор, исторические предания, топонимия, народная этимология

A.V. PANYUKOV. HISTORISM OF FOLKLORE VS FOLKLORISM OF HISTORY: THE PLOT ABOUT MURDER OF PRINCE VASILY VYMSKY

The paper deals with private aspect of the subject «history as the text - text as history». Analyzing the plot about murder of prince Vasily Vymsky (1480), the author shows how, as a result of difficult, nonlinear interaction of oral and written narrations there appears quasihistorical reality.

Key words: Komi-Zyrians, traditional culture, folklore, historical narrative, toponymy, folk etymology

Возможно, в метатексте многовековой истории Российского государства 50-летнее наместничество вымских князей (1451–1502 гг.)* могло бы вообще затеряться, если бы не ключевая роль именно этого хронотопа в определении будущей, евразийской судьбы России. Отсюда, с Перми Вычегодской, в эти годы было совершено шесть крупных походов великокняжеских войск, связанных с покорением зауральской Югры и окончательным присоединением пермских земель, а вслед за ними – и Новгорода к Москве. Князя вымские управляли краем, ходили вместе с московской ратью «воевать Югорскую землю», участвовали в походе

на Казань. И, видимо, не случайно на всем пространстве России остался единственный населенный пункт с символическим названием Княжпогост, и на гербе Княжпогостского района изображена шапка Мономаха – символ древнего центра страны, которого удостоены только бывшие столицы великих княжеств.

Тем не менее, на уровне местной истории именно Княжпогост не оставил ни одного исторического свидетельства: неведомо, кто его основал, неведомо, жил ли там кто-либо из вымских князей. Этот парадокс абсолютно прозрачной этимологии и абсолютно темной истории на протяжении пяти веков выполнял и продолжает выполнять аттрактивную роль в формировании локальной истории. Однако из всего спектра имеющихся на сегодняшний день фольклорных, литературных и околонучных ретроспекций на тему вымского княжества только один сюжет обладает всеми признаками исторической достоверности – это сюжет об убийстве князя Василия Вымского. Помимо того, что в фольклорной традиции бытуют предания об этом событии с четкой фиксацией места убийства (место могут показать и сейчас), факт убийства князя в 1480 г. зафиксирован в письменном источнике XVI в. – Вычегодско-Вымской летописи [1] (далее – ВВЛ). Таким образом, у нас есть уникальная возможность сопоставить фольклорную и историческую версии этого, надежного по аргументации события местной истории, и попытаться понять, как оно пережило пять столетий. Начнем с последнего источника.

* В 1451 г. после подавления «Шемякиной замятни» Великий московский князь Василий Темный, укрепляя свою власть, назначает московских наместников в города, отобранные у противника. «Правити пермской землей Вычегодскою» в качестве московского наместника был отправлен князь Ермолай; о его дальнейшей судьбе нам ничего неизвестно. Его старший сын Михаил возглавляет династию Пермских князей, а младший Василий (около 1435–1480 гг.) после смерти отца становится вторым вымским князем. О князе Василии Ермолаевиче мы знаем, что он в 1465 г. возглавлял отряды вымичей и вычегжан в походе устюжского войска под предводительством воеводы Василия Скрыбы в земли Югры, а в 1480 г. погибает от рук вымичан (сюжету о его гибели собственно и посвящена наша статья). Князю Василию наследовали сыновья Федор и Петр. Петр Вымский погибает в 1499 г. при штурме Пельма во время очередного зауральского военного похода. В 1502 г. князь Федор Васильевич был сведен с Выми и отправлен наместником в Пустозерский острог, где через несколько лет умирает, и род вымских князей пересекается.

ВВЛ начал вести в конце XVI столетия (т.е. спустя 100 лет с момента рассматриваемого нами события) основатель Усть-Вымской Архангельской пустыни Мисаил; после его смерти летописные записи были продолжены устьвымским благовещенским попом Евтихием. Изложение событий доведено летописцами до 1619 г. – в этом году вологодский архиепископ Макарий запретил вести летописи «малым попам», т.е. священнослужителям низких рангов. Какое-то время летопись хранилась в Усть-Выми, а потом в Окваде. В 1813 г. ее по распоряжению вологодского епископа Евгения отослали в Вологду, где рукопись бесследно исчезла. Однако перед этим вологодский семинарист А. Шергин снял с летописи копию, которая в течение многих лет находилась сначала во Введенской церкви в Окваде, затем в частных руках, а с 1915 г. – в Усть-Вымской Благовещенской церкви. В 1927 г. эту копию обнаружил в Усть-Выми начинающий писатель и краевед П.Г. Доронин и сделал с нее список. Впоследствии шергинская копия также где-то затерялась, а Доронин спустя 30 лет подготовил текст летописи по своему списку к печати, и в 1958 г. она была опубликована. Летопись написана на русском языке, охватывает период с 1178 по 1619 гг., и, по всей видимости, была известна достаточно узкому кругу лиц.

Согласно ВВЛ, князь Василий Ермолаевич Вымский решил построить на Выми возле Турьи новый укрепленный городок, но был убит взбунтовавшимися местными жителями. В погодной записи за 1480 г. сообщается: *«Лета 6988 почал князь Василей Вымской город на Выме на Турею строити, а вымичем не любо тое городок строити: пошто нам этот городок и на кого, и посекали вымичи Василя князя на смерть»* [2].

При целом ряде спорных моментов, выявленных исследователями в тексте ВВЛ [3], описанное событие подтверждается целым рядом косвенных свидетельств. Достоверно известно, что в 1481 г. князя Василия уже не было в живых, хотя нигде больше не упоминается об убийстве. Так, в первое описание Перми Вычегодской 1481 г. Ивана Гаврилова попали сысольские угодья, отданные пыелдинскому монастырю сыновьями князя Василия на поминование родителя; о них говорится в «Жалованной грамоте» великого князя Ивана Васильевича жителям Перми Вычегодской 1484/85г. [4]. Достоверность этой записи придает и точное описание произошедшего убийства. По мнению Б.Н. Флори, первого исследователя ВВЛ, летописец пользовался источниками XV в., в частности, не дошедшей до нас Пермской владычной летописью, которая велась в Усть-Выми при епископе Филофее (1471–1501 гг.) [5]. Таким образом, погодная запись за 1480 г. могла быть зафиксирована во владычной летописи в хроникальном порядке, а уже оттуда была переписана в ВВЛ.

Эти аргументы придают историческую правдивость и дошедшим до нас фольклорным произведениям. В отличие от краткого сообщения ВВЛ, устные предания о князе Василии достаточно детально описывают это событие и в целом летопис-

ное описание гибели князя входит в сюжет народных преданий о князе.

Согласно основному сюжету предания, весьма точно подтверждающему запись летописи, князь Василий был убит в местечке, которое и теперь называется «местом убийства Василия»: *«Тая Турьяяс вёлма коркё историяыс, вот. Мыйке, тае вёлма московскёй пограничнэй отряд тая, пограничнэй округ. И тані вёлма турецьяс ли мый ли, вот сіен Турьясё нимсё пуктылёмабсь. А сія бёрти татчё кольёмабсь, Видзёд, тан вёлм олёны, Княжпогостас – погостсё шуёны, сэні князьыс вёлм олё, а татчё вёлм кутшёмкё Вась – царь ли, тоже князь ли, татчё стрбитчыны Васьыс кёсйёма, вот. Сэні Кар яг выйим, шуёны «Кар Яг». И Кар ягас сія заводитлёма стрбитчыны, вот. А йёзыс, сылён, важён од вёлм, видзёдлы, прёмысляйтёны, сыысь и нажевитчёны вёлм, а таті прёмыса вёлма. И мед сія купеческёй, сія князьыд овмёдчис, прёмыссё некодлы йёзыслы кыйнысё некыдзык вёлі. Ная зськё гёля куччисны олны, сія весьтё куччис экплатируйтны, и вот сія Васьсё вийёмабсь сэтчё шор дорас кыччикё, и вот сіе «Васьёс вийём» и шуёны, а ягсё «Кар ягён» вексё шуасны. Кытчё кёсйылёма стрбитчыны. А зэв мича ягыс сэні: тшак петё, гоб весиг петё. Ми сэтчё частё во-льывлам, вуджавльывлам, Кар ягё вуджавльывлам гобла. А сіе шор дорыс мыйкеыс да устье Пожегыскёд против Васьёс вийёмны»* (Эта история в Турье была когда-то. Турья была московским пограничным постом, пограничным округом. И были здесь турецы что ли, поэтому и название Турья дали. И потом они здесь и остались, здесь жили. А в Княжпогосте – погост так называют, там жил князь, а сюда пришел какой-то Василий – то ли царь, то ли князь, здесь он хотел построить город. Там есть местечко Кар яг (букв. 'бор, в котором стоял город'). И в Кар яге он начал строится. А прежде ведь, сам посуди, промышляли охотой, на этом и жили. А места здесь богатые для промысла были. И вот если бы этот купеческий, этот князь поселился, то народу и промышлять было бы невозможно. Стали бы они бедно жить, он бы стал их эксплуатировать. И вот, этого Василия убили где-то у этого ручья. И ручей стал называться Васьёс вийём 'убийство Василия', а бор – Кар ягом всегда называют. Это место, где он хотел город – кар построить. Бор там красивый, там грибы всегда растут, даже белый гриб. Мы туда часто ездим, на другой берег, за грибами. А это место у ручья напротив устья Пожега, где Василия убили) [6].

При всей схожести описываемого события – убийства Василия Вымского – сюжет предания имеет четко выраженный «оттопонимический» характер: есть точное место строительства городка – Кар яг, есть точное место убийства – ручей Васьёс вийём недалеко от городищенского бора. Кроме того, народные предания передают множество деталей и подробностей об этом событии, которых нет в ВВЛ:

«Олёмабсь татёні Турьяяс Василий Вымский. Олёма тысячи шёссот сорок втором году.

Вёлъм татён, Лав местан керкаыс, Василий Вымскейыслён, Турьяын, Лав меставын. А этия Кошлён керкаыс весьсы вёлъм яг. Весьсы тати яг вёлма, Турьяыс, весьсы яг. И Кош Вань керка местаад вёлма кузнеча сэтэни, Василий Вымскейыслён. И Василей Вымскейыс мунас налог өктёны, сборьяс, этия, кудз шуасны, крестьяналысь. И Весьлянао каас, Василей Вымскейыд. Весьлянаысь непосильной налог өктё сия. И бёрти крестьянаыс сэн бунтуйчасны, Василей Вымскейыдлы. Крестьянаяс бунтуйчасны и вётёдасны сыелы, Василей Вымскейтё. Вётёдасны, и татче Жигановкаад чуть оз во, Васьёс вийём. Пожеге вогад, Жигановка оз во сэтче, но, Пожег вом дорё, сэтён нель кымын километра оз во, Васьёс вийёмё сיעс вётёдасны, весьлянской крестьяна, и сэтэн сיעлы виясны, кераласни из вылын, киласэ кераласни. Из вылын. И сия век, немсэ, и ёни век Васьёс вийём и Васьёс вийём. Сия местаис и сия весь участкис Васьёс вийём» (Жил тут в Турье Василий Вымский. Жил он в 1642 году. Был у него здесь дом, на месте избы Лава. А место, где дом у Коша, все это было лесом. Кругом был бор. И на месте дома Кош Ваня была кузница у Василия Вымского. И пойдет Василий Вымский налог собирать, сборы, как сказать правильно, у крестьян. И в Весляны поднимется Василий Вымский. В Веслянах он непосильный налог брал. И крестьяне, в конце концов, взбунтуются и догонят его. Догонят, и здесь, до Жигановки не доходя, там километра четыре не дойдет, есть местечко *Васьёс вийём*, перед Пожегом. У устья Пожега. Там его догонят веслянские крестьяне и там его и убьют, на камне порубят, отрубят ему «мужское» – «киласэ кераласни из вылын». И это место от веку и сейчас еще называют *Васьёс вийём* – «убийство Василия». И это место, у участок вокруг называют *Васьёс вийём»*) [7].

Даже при беглом сравнении летописного текста и устных преданий их органическая взаимосвязь кажется очевидной. Устные предания развивают и детализируют тот же сюжет, в основе которого лежит реальное историческое событие прошлого. В этой исторической действительности сама взаимосвязь устной и письменной традиций предстает как абсолютно очевидная историческая реальность (назовем ее **Реальность 1**), соотносимая с хронологией: в 1480 г. происходит убийство князя, спустя 100 лет это событие фиксируется в ВВЛ; параллельно с этим устная традиция не только сохраняет память об этом событии, но и фиксирует его топологию в местной топонимике (точное место убийства, место строительства городка), благодаря чему в мельчайших деталях сохраняет и транслирует на протяжении пяти веков предания о князе Василии. После публикации в 1958 г. текста ВВЛ эти две версии – фольклорная и летописная взаимоподтверждаются и далее уже сосуществуют как единый исторический нарратив.

Однако есть одно объективное противоречие, не позволяющее принять **Реальность 1** за достоверную и единственно возможную. Дело в том, что четко зафиксированный на местности «город» устных преданий никак не может быть «горо-

дом на Турею» летописи, поскольку он не имеет никакого отношения к вымским князьям. Этот археологический памятник, получивший название «Пожегское городище», сегодня имеет довольно точную датировку [8]. Городище расположено в местечке Карьяг, напротив устья р. Пожег, правого притока Выми, на 4 км выше с. Турьи (и на 2 км ниже ручья *Васьёс вийём шор*). Археологические исследования позволяют уверенно говорить о том, что это был укрепленный древнерусский (новгородский) стан дружинников XII-XIV вв., переросший в торгово-ремесленный и военно-административный центр края. Городище перестает функционировать в конце XIV в., вероятней всего, погибает в одной из вооруженных стычек с московскими войсками, и его уже не существовало к моменту прихода на Вымь Стефана Пермского, т.е. к 1380 г. (за 100 лет до смерти Василия Вымского).

Мотив «строительства города» по исторической логике должен быть связан с Княжим погостом, который находится ниже с. Турьи на 50 км и расположен примерно на середине пути между селами Усть-Вымь и Турья. «Княжеский погост» впервые упоминается в жалованной грамоте Великого князя Московского Ивана III епископу пермскому Филофею (1490 г.), т.е. этот населенный пункт возникает при жизни князя Василия. Но ни ВВЛ, ни какой-либо другой исторический документ не сообщает о князе-основателе погоста, да и едва ли летописец мог назвать Княжий погост «городом на Турею».

Возникает явное противоречие между летописным фактом и устными сюжетами и само собой напрашивается вопрос: а где же тогда был город, который хотел построить Василий Вымский в 1480 г., и был ли он в исторической действительности?

Чтобы прояснить общую картину, возвращаемся назад в будущее, к фольклорной традиции XX в. и обнаруживаем один удивительный факт.

В 1946 г., в той же Турье, где бытовали приведенные выше предания, был записан вариант сюжета, в котором вместо князя фигурирует местный герой-богатырь Василий – *Ён Вась* (букв. 'Сильный Василий'). Согласно этому сюжету, именно богатырь Василий решает построить город в местечке *Кар яг*, но погибает от рук коварных веслянцев: «Он жил в Кони, этот богатырь Василий. Жил он один, очень сильный человек. У него был серый конь, большой, громадный. И был он богатым. От Турьи выше по реке есть маленькая речка под названием Пожег. На другой стороне устья Пожега, выше по течению, место называется *Кар Яг*. Там, оказывается, он, богатырь Василий, хотел один построить город. А место на бору, очень красивое и ровное. Вот однажды он дал в долг денег веслянским мужикам. Веслянцы обещали за это город построить. Но веслянцы не пришли на работу. Трижды он просил вернуть долги, но веслянцы не вернули. Пошел он в страдную пору к должникам. Взрослых в это время никого не было, все были на сенокосе. Он пришел в Весляну. И за то, что долги ему не вернули, он все их дома

разрушил. Пришли весляны со страды, а дома разрушены, все развалены. Собрались весляны, посоветались и решили убить Василия. Излучиной убийства – «Вийм кӧтшас» называют место, где они это сделали – там от излучины была дорога, ведущая в гору. Туда к дороге пришли весляны, все с копьями. Богатырь Василий стал подниматься по этой горе, по этой дороге. А место было лесистое, мелкий ельник. Набросились весляны со своими копьями и закололи его, свалив с коня. Человек двенадцать напали. Сбросили с коня и убили там Василия. Большой камень там еще есть у дороги, на нем и разрубили его всего на куски. Потом соседи спохватились: "Ох, ты, наш Василий уехал и не приехал. Жив он или нет?" Только это сказали, конь его и прискакал сам. Вийм переплыл. Соседи и пошли, человека четыре. А дорогу знают, где он ездит. Пошли, забрались на гору и нашли – разрублен весь. Вот они потом труп его зарыли, похоронили. А его хозяйство все осталось» [9].

Опять же очевидно, что перед нами два варианта одного и того же предания с целым рядом совпадающих деталей и с общей топонимической привязкой. Но куда девался образ князя? Здесь все, прежде всего, вспоминаем, что приведенные выше устные предания об убийстве князя Василия зафиксированы в 1981 г., т.е. уже после публикации текста ВВЛ (1958 г.). И, вероятно, совсем не случайно в последнем тексте предания о князе просвечивает «летописная стилистика» (перед нами не просто предание, а своего рода «погодная запись за 1642 г.» – дата, возможно, каким-то образом связана с историей таможни в с. Турья). Кроме того, в эти самые годы именно на этом участке Выми велись активные археологические работы, и, если не сам сюжет из ВВЛ, то образ князя Василия Вымского мог быть занесен в устную традицию и археологами.

Чтобы быть беспристрастным, сделаем еще один шаг назад и переместимся к началу XX в., и еще раз утвердительно скажем, что **ни в середине прошлого века, ни в его начале устная традиция не знала о вымском князе Василии.**

Этот факт подтверждается и разысканиями известного исследователя (этнографа, археолога, фольклориста и лингвиста) Алексея Семеновича Сидорова, которому принадлежит и честь открытия в 1920-е гг. Пожегского городища. В своих археологических разысканиях А.С. Сидоров всегда опирался и на полученные от местных жителей сведения. В данном случае он к тому же несколько лет (1913-1915 гг.) до этого работал сельским учителем в д. Кони, и не мог не знать местного фольклора. Итоги его археологических разведок на Выми были опубликованы в статье «Памятники древности в пределах Коми края» [10]. Вот что он пишет в 1924 г. о Пожегском городище (А.С. Сидоров назвал его Турьинским по близости к этому селу): «С одним из рурьев, владающих в р. Вийм в трех километрах выше данного городища, Васес вийӧм шор'ом, связано предание о богатыре Василии: Василий хотел здесь устроить город (в современном смысле), и он исполнил бы, конечно, свое намерение, если бы его

не убили весляны (он был захвачен ими хитростью)» [11].

Очевидно, А.С. Сидоров здесь пересказывает сюжет, близкий к варианту, записанному в 1946 г. Во всяком случае, никаких других версий, как-то связывающих это предание с вымскими князьями, он не приводит. Хотя там же упоминает о существовании преданий о князьях, живших когда-то в Турье. Более того, отталкиваясь от известной ему погодной записи Архангелогородской летописи за 1465 г. о походе Василия Скрыбы в Югорскую землю, в котором участвовал князь Василей Вымский Ермолаевич, А.С. Сидоров первым выдвигает предположение о возможной связи названия Васес вийӧм шор и, соответственно, предания о богатыре с именем князя Василия Вымского [12] (т.е. первым вводит в интеллектуальный оборот эту версию). В последующей, неопубликованной работе 1937 г. «Археологические памятники Вымского района Коми АССР» [13] ученый ссылается на те же источники и повторяет это же предание, добавляя к нему мысль о русском происхождении вымских князей: убийство чужеродного, богатого русского князя более соответствует сюжету. Более того, основываясь на полученных им археологических данных, А.С. Сидоров связывает само Пожегское городище со временем деятельности вымских князей. Он предполагает, что остатки хорошо оборудованного жилища (наличие остатков болгарского замка) в центре городища могут быть связаны с княжеской резиденцией, т.е. в точности предсказывает появление записи ВВЛ за 1480 г.: «Почал князь Василей Вымской город на Выме на Турею строити...» (Отметим еще раз, что в 1927 г. П.Г. Доронин уже сделал копию ВВЛ, и, наверняка, он был знаком и с самим А.С. Сидоровым, и с его работами, но по каким-то причинам еще 30 лет молчал об этой рукописи).

Итак, перед нами возникает следующая хронологическая последовательность: в 1480 г. происходит убийство князя Василия, которое зафиксировала ВВЛ; устная традиция по каким-то причинам создает и транслирует предание о местном богатыре *Ӗн Вас'е*, но к 1981 г. возвращается к исходному образу князя Василия. Такой «двойной бриколаж» устной традиции уникален, но, видимо, вполне возможен, учитывая активное внедрение в повествовательную традицию исторических сведений. Но он не дает ответа на самый первый вопрос: где этот «город на Выме на Турею»? Ведь совершенно очевидно, что ВВЛ не должна говорить о Пожегском городище, к которому четко привязаны народные предания. А если это не тот город, то и место убийства *Васьӧс вийӧм*, явно привязанное к Пожегскому городищу, также не имеет отношения к убийству князя Василия. Чтобы как-то увязать фольклорную и летописную версии события, нам необходимо внести коррективы в **Реальность 1**. Итак, что мы имеем.

В Реальности 1 (место события нам неизвестно) происходит убийство князя Василия, которое спустя 100 лет фиксируется ВВЛ. Устная традиция сохраняет память об этом убийстве, но в соответствии с повествовательными канонами заменяет образ князя на более привычный образ мест-

ного героя-богатыря Василия. Далее это предание приобретает топонимическую привязку (место строительства города в *Кар яге* и место убийства у ручья *Васьёс вийём шор*), создав новую **Реальность 2**, имитирующую **Реальность 1**. Далее, в 1980-х гг. спустя 500 лет в устную традицию из ВВЛ возвращается исходный образ князя Василия, а в историческом дискурсе место **Реальности 1** прочно занимает его имитация.

Как только принимаем такую последовательность развития устной традиции, мы вынуждены задаться вопросом: если реальное место убийства неизвестно, то какой хронотоп воссоздадут топонимические предания? Ответ напрашивается сам собой: устная традиция буквально воспроизводит запись ВВЛ: «город на Турею» четко соотносится с реально существовавшим местом городища в *Кар яге*; далее спонтанно появляется и место убийства. Возникает временная петля, не поддающаяся рациональному объяснению: устные предания не могли возникнуть без записи ВВЛ, а запись летописи подтверждается только устной традицией.

Этот парадокс можно снять, если только выдвинуть в качестве «истинной» **Реальности 3** обратную последовательность: В местечке *Васьёс вийём шор* происходит убийство местного жителя *Ён Вас'я*, в устной традиции возникает топонимическое предание об этом событии; случайно оказавшееся рядом место городища втягивается в сюжетную канву, и т.д. Какой-то вариант устного предания попадает в двуязычную прицерковную среду, образ *Ён Вас'я* идентифицируется с образом Василия Вымского; далее уже сюжет об убийстве князя Василия обретает новую датировку и попадает в ВВЛ. Спустя 400 лет «квазиистория» летописи воспринимается устной традицией и возникает та самая **Реальность 1** с ретроспекцией на событие 1480 г. Именно **Реальность 3** воссоздается на основе народных преданий, она транслируется современной фольклорной традицией, но в ней уже нет даже отголосков о богатыре *Ён Вас'е*.

В такой версии развития сюжета об убийстве остается одна «случайность» – это совпадение имен двух героев. Несомненно, вплоть до XIX в. имя Василий после имени Иван на Руси занимало по популярности второе место (даже в нашем тексте четыре *Василия*). В истории православия известно более 30 святых покровителей имени Василий, что отражено и в святцах. С большой натяжкой этот тезис можно спроецировать и на вымских коми, 100 лет назад принявших православие, и объявить совпадение имен *Ён Вас'я* и князя Василия случайным, но вполне возможным. Однако, уже зная по опыту чреватость подобных допущений, стоит еще раз вернуться к истокам и внимательно проанализировать топонимическую основу сюжета.

Топоним *Васьёс вийём шор* 'ручей убийства Василия'

PRO. Связь топонима с местом смерти человека – явление весьма распространенное, мотив гибели конкретных людей характерен и для «ситуативных», т.е. отражающих связанное с географическим объектом событие, топонимов, и для широкого

спектра топонимических текстов. Коми топонимия здесь не является исключением. Близкие к анализируемому *Васьёс вийём шор* и по структуре и семантике названия зафиксированы, например, в микротопонимии Прилузья: ойконим *Малань вийём дзиб* букв. 'гора, на которой убили Маланя/Маланью'; гидроним *Вийсьём шор* букв. 'ручей, где произошло убийство' [14]. Для сложносоставных коми топонимов глагольные (причастные) конструкции такого типа – явление абсолютно исконное и распространенное [15]. Кроме того, топоним четко привязан к городищу и явно имеет нарративное происхождение, т.е. представляет собой «свернутый» в топоним микросюжет, не отделимый от стоящего за ним события.

CONTRA. *Васьёс вийём* фигурирует в вариантах *Виём кётшас*, *Васьёс виём*, *Васьёс вием шор*, *Васьё вийём шор*, и окказиональное *Васим вием шор* – т.е. при четкой привязанности убийства к ручью, сам аппелятив *шор* здесь явно вторичен. Учитывая то, что общим элементом для всех вариантов является слово *вийём/виём/вием*, логично предположить, что первичным здесь был гидроформант *виам* 'проток по низине, образуемый в половодье, полый' (в летнее время обычно остается небольшой ручеек; *виам* < *виавны* 'течь тонкой струйкой, капать'), в результате дезтимологизации ставший частью собственно названия. Это соотносится и с топографией местности, и «вписывается» в общий гидроконтест (чуть выше *Васес вийём* в Выми впадает ручей *Ыджыд ёль* букв. 'Большая лесная речка'; ниже – безымянный ручей *Шор* и ручей *Каршор*). Аппелятив *виам* встречается по всей Вычегде, включая бассейны Сысолы и Выми, весьма распространен в микротопонимике Усть-Вымского района в силу сложности гидрорельефа Вычегды на этом участке. Аппелятив *виам* обычно входит в структуру сложносоставных топонимов в качестве коннотатора, поэтому есть смысл продолжить реконструкцию гидронима 'проток *Васес/Васьёс*'.

На сегодняшний день микротопонимика республики исследована очень слабо. Поэтому наши выводы могут показаться недостаточно аргументированными. Тем не менее, нам удалось обнаружить несколько параллелей. Прежде всего, отметим гидроним *Васем*, связанный с глубоким местом на Вычегде ниже устья Выми между д. Тыдор и с. Айкино. По местному преданию, записанному в 1978 г., *Васем* соединялся с болотом *Кутшпозья* и составлял старое русло Вычегды: «*Важен ёлы сийёс шуюны насколько ва берегыс вежсема, ва, перекаат. Перекаатыс ёлы мян вот татысянь кык километра, вот ёлы, ёны кёны Кутшпозьяыс, сия ёлы старой ваыс, Эжва. И сия Старой Эжвасё шуюны: бёр воас кор сэтчё перекаат, сэк лоё ёлысь кутшёмкё важся олём, и важся притчатыс мян не тёдны, мый ёлёма важся берегыс. И вот ты улад, шуюны тай Васем – но, сия Васемыс тоже Важ Эжва, зэв джуджыд, безмерной. Высота оз тёдны, край, некоторой берегыс даскёкьямыс метров, мерайтлывлёмась, сийё тёдны. А сэсся оз тёдны*

глубина. Джуджыд и съод ва. А Кутшпозъяид ёлёма важ Эжава» [16]. (Раньше называли, вот насколько уже берег реки изменился, был перекат. Перекат был от нас в двух километрах, был он там, где теперь <болото> Кутшпозъя, это была старая река, Вычегда. И про эту старую Вычегду говорят: когда обратно на этом месте появится перекат, только тогда жизнь прежняя вернется, но старые притчи нам не знать, что она означала? И вот тогда Кутшпозъя была старым берегом реки. И вот ниже озера, называют место *Васем* – вот этот *Васем* тоже старая Вычегда, очень глубокая (старица), безмерная. Глубину не знают, в некоторых местах у берега восемнадцать метров, измеряли когда-то, знают. А дальше не знают о глубине. Глубокая и темная вода. А Кутшпозъя <болото> было старой Вычегдой). Идентифицировать это место на карте нам пока не удалось; возможно, речь идет о небольшом заливе на правом берегу реки, соединяющем озеро с рекой.

Далее, на верхней Вычегде мы обнаружили близкие к искомому *васес* топонимы *Васевойт* (урочище близ с. Аныб) и *Васёвгёллек* (урочище, с. Деревянск) [17]. Как нам удалось выяснить, ороним *Васевойт* связан с местом на берегу реки ниже села Аныб, а также с обозначением рыбной тони – небольшого залива на р. Вычегде; по убеждению местных жителей, никак не связан с именем *Василий*, хотя они и затрудняются объяснить происхождение этого названия. Вероятно, этот ороним так же состоит из двух гидронимических апеллятивов *васе(е)* (вариант приведенного выше гидронима *васем*) и *войт* 'сырое, глухое место в пойме реки, поросшее кустами черемухи и смородины', но в данном конкретном случае формант связан не с поймой реки, а с низиной у крутого берега, поросшей кустарником. Этот залив связан с цепью руслообразных озер, видимо, некогда представлявших старицу р. Вычегды. Таким образом, формант *васе/васев* можно связать со значением 'залив, связанный с озерами старичного происхождения'. Соответственно, другой верхневыхегдский гидроним *Васёвгёллек* также состоит из двух гидроформантов: *Васёв* и *гёллек* < *гоблек* 'омут, глубокая яма на дне реки или озера' [18]. К сожалению, в современной традиции пока не удалось восстановить его точное местонахождение.

Таким образом, слово *Васес* в названии *Васес вийом шор* – явно восходит к апеллятиву с формантом *ва* 'вода; река'. Лексемы *васем*, *васе(е)*, *васёв* и *васес* сложно подвести к одной форме, поэтому можно предложить несколько гипотетических возможных этимологий: а) *ва* + *сён* 'ложбина, лощина' (< общепермское 'залив в долине реки', 'протока'); здесь же вариант *сёнмас* 'ложбина в долине реки, заливаемая в половодье водой'; В этом же ключе интересна параллель с удмуртским *сюм* 'маленькое продолговатое озеро около реки' [19], 'залив', 'затон' [20]; и водоем *Васем* и оронимы *Васевойт* и *Васёвгёллек* связаны с небольшими, но глубокими местами, близкими к понятию 'залив'; здесь же вариант *Васес вием кётшас* < излучина на реке, залив, куда впадает *Васес вием шор*; б) *ва*

+ *сю* 'рот, полость, горло' (лексема, ныне утратившая самостоятельность; см.: [21] > 'устье, горловины (водоема)'; в) *васин* < *ва* + *син* 'ключ, источник', 'окно на болоте, трясине'; г) *ваасем/ваасе* 'заполненный/заполняемый водой' > *васем/васе*. Как бы то ни было, гидроформантное происхождение слова *васем* не подлежит сомнению, а антропонимическое осмысление этого реликта – результат вторичного народно-этимологического осмысления.

Итак, перед нами возникает еще одна **Реальность 4**, которая будет выглядеть следующим образом:

1. Гидроним *Васес виям* 'проток из водоема-*васес*' (возможно, исходная форма была другой – *Васем виям/Васев виям*) под воздействием вошедшего в местный ономастикон имени *Вась* 'Василий' деэтимологизируется в гидроним *Васес вийом шор* 'ручей, где убили Васю/Василия'.

2. Под воздействием оказавшихся поблизости антропогенных микролокусов (площадка бывшего городища-*Кара*, бор *Кар яг*, ручей *Кар шор*) возникает сюжет об убийстве строителя города *Василия*, связывающий два локуса – место городища и место убийства.

3. Далее, уже по устойчивому сценарию, один из вариантов этого топонимического сюжета попадает в прицерковную среду и идентифицируется с именем князя *Василия Вымского*.

4. Сюжет об убийстве князя *Василия* фиксируется в ВВЛ.

5. Сюжет об убийстве князя *Василия* из ВВЛ во второй половине XX в. «возвращается» в устную традицию и сливается с преданиями о богатыре *Ён Вась*, замещающая главного персонажа на князя *Василия*.

6. Предания об убийстве князя *Василия* внедряются в научный дискурс.

Здесь стоит отметить, что встречающиеся во многих исторических исследованиях тезисы о том, что убийство князя было вызвано «боязнью последующего усиления феодального гнета» или «боязнью за свои угодья» – это почти дословные цитаты из народных преданий, приведенных выше.

Выводы

В исторической действительности никакого строительства «города на Турею» не было, и вымичане не убивали князя *Василия Вымского*, как не убивали и богатыря *Ён Вася*. Сюжет об этом историческом событии имеет чисто фольклорные корни. Он возник в результате народно-поэтического осмысления случайно оказавшихся рядом топонимов. Поэтические особенности этого уникального сюжета и механизмы его самосборки и самопорождения – следующий этап настоящего исследования.

Литература

1. *Вычегодско-Вымская (Мусаило-Евтихеевская) летопись // Историко-филологический сборник Коми филиала АН СССР. Сыктывкар, 1958. Вып. 4. С. 257–271.*
2. *Там же. С.262.*

3. *Анализ целого ряда уникальных сведений летописи, начиная с титула «от роду Верейских», см.: Флоря Б.Н. Коми-Вымская летопись // Новое о прошлом нашей страны. М., 1967. С. 218–231; Вершинин Е.В. Статус князей Вымских и Великопермских как правителей (административный аспект присоединения Северного Приуралья к Русскому государству) // Культурное наследие Азиатской России: Материалы I Сибиро-Уральского исторического конгресса. Тобольск, 1997. С. 122–124; Мухин В.В. Еще раз о пермских князьях // Чердынь и Урал в историческом и культурном наследии России. Пермь, 1999. С. 104–106; Вершинин Е. В. И еще раз о князьях Вымских и Великопермских // Проблемы истории России. Вып. 3. Новгородская Русь: Историческое пространство и культурное наследие. Екатеринбург, 2000. С. 285–305; Корчагин П.А. Из ранней истории Перми Великой: князья Пермские и Вымские // Филолог / Интернет-журнал Пермского государственного педагогического университета. Пермь, 2011. Выпуски № 13, 14. URL: <http://philolog.pspu.ru/module/magazine>. (Дата обращения 7.06.2012)*
4. *Документы по истории коми // Историко-филологический сборник. Вып.4. Сыктывкар, 1958. С.246.*
5. *Флоря Б.Н. Коми-Вымская летопись...С. 231.*
6. *Фольклорный фонд Института языка, литературы и истории Коми НЦ: А0696-8 (далее – ФФ ИЯЛИ). Записан Ю.Г. Рочевым в 1981 г. от М.А. Жилиной 1931 г.р. в с. Туръя Княжпогостского р-на РК. Отредактированный текст на коми языке опубликован в: Коми легенды и предания / Вступ.ст., сост., примеч. и перевод Ю.Г. Рочева. Сыктывкар, 1984. №23. С. 35–36.*
7. *ФФ ИЯЛИ: А0697-10. Записан Ю.Г. Рочевым в 1981 г. в с. Туръя Княжпогостского р-на РК. Данные об исполнителе не зафиксированы.*
8. *Савельева Э.А., Кленов М.В. Пожегское городище. Сыктывкар, 1992. 34 с. (Серия препринтов «Научные доклады» / Коми научный центр УрО РАН; Вып. 278).*
9. *Записан Г.А. Федоровым в 1946 г. от В.А. Кучменева (68 лет) в с. Туръя. На коми языке опубликован: Коми легенды и предания. №36. С.51–52.*
10. *Сидоров А.С. Памятники древности в пределах Коми края // Коми му. 1924. № 7–10. С. 58–60.*
11. *Сидоров А.С. Памятники древности в пределах Коми края. № 8. С.59, прим.20.*
12. *Там же. С. 59.*
13. *Сидоров А.С. Археологические памятники Вымского района Коми АССР (по материалам обследования 1928 г.). 1937 (машинопись) // Архив ИИМК РАН. Фонд №35. Оп.2. № ед.хр. 9. Л. 53.*
14. *Мусанов А.Г. Географические названия Лузско-летского бассейна Республики Коми. Сыктывкар, 2006. С.72.*
15. *Мусанов А.Г., Понарядов В.В. Причастия в коми топонимах (на материале топонимии верхнего Прилузья) // Коренные этносы севера Европейской части России на пороге нового тысячелетия: история, современность, перспективы: Материалы Международной научной конференции (17–19 мая 2000 г.). Сыктывкар, 2000. С. 482–484.*
16. *ФФ ИЯЛИ: К382. Записан в 1978 г. Н.Д. Бараксановой в д. Тыдор Усть-Вымского района РК от А.Е. Коняевой.*
17. *Сорвачева В.А., Сахарова М.А., Гуляев Е.С. Верхневьчегодский диалект коми языка. Сыктывкар, 1966. Вып. 10. С. 236.*
18. *Сравнительный словарь коми-зырянских диалектов / Сост. Т.И. Жилина, М.А. Сахарова, В.А. Сорвачева. Сыктывкар, 1961. С. 81.*
19. *Лыткин В.И., Гуляев Е.С. Краткий этимологический словарь коми языка. Сыктывкар, 1999. С.252.*
20. *Удмуртско-русский словарь: Ок. 35000 слов / Под ред. В.М.Вахрушева. М.: Русский язык, 1983. С.406.*
21. *Лыткин В.И., Гуляев Е.С. Краткий этимологический словарь коми языка. С.273.*

Статья поступила в редакцию 18.06.2012.

УДК 553.982.2(09):622.276:665.7(470.13)

ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯРЕГСКОЙ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ

А.А. КАЛИНИНА*, Е.П. КАЛИНИН**

**Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера
Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар*

***Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
lukanicheva@energy.komisc.ru, burseb@geo.komisc.ru*

Рассмотрены исторические аспекты открытия Ярегского месторождения. Показаны специфика нефтяной залежи, технологии ее добычи, сформулированы факторы, способствующие развитию нефтедобычи и комплексного использования добытого сырья с получением продуктов переработки повышенной стоимости.

Ключевые слова: Ярегское месторождение, тяжелая нефть, технологии добычи, глубокая переработка, эффективность

A.A. KALININA, E.P. KALININ. GEOECONOMIC ESTIMATION OF MULTIPURPOSE UTILIZATION OF THE YAREGA HEAVY OIL

The historical aspects of Yarega oilfield discovery are considered. Specificity of oil reservoir and extraction technologies are shown. The drivers of further oil production and complex utilization of extracted heavy crude oil to produce high valued processed products are formulated.

Key words: Yarega oilfield, heavy oil, extraction technologies, deep refining, efficiency

«Людям, мечтающим о новом Баку на Ухте и ищущим легкой наживы, надеяться на Ухту не следует. Только явившись во всеоружии науки и техники, со значительными денежными средствами, при упорном труде и энергии возможно вызвать к промышленной жизни этот темный угол России». П. Полевой, 1907 г. [1].

В стратегическом развитии экономики России намечена смена парадигмы регионального развития – отход от отраслевого взгляда на экономику региона и переход к кластерному направлению. В русле смены парадигмы лежит и новый подход к оценке и эффективному использованию природных ресурсов, который предполагает: глубокую и комплексную переработку, создание современной развитой транспортной системы, соответствие получаемых продуктов мировым стандартам при максимальном использовании региональных преимуществ. Проявлением нового подхода является принцип учета экономических интересов действующих субъектов [2]. Примером реализации эффективного использования природных региональных ресурсов может стать решение проблем добы-

чи и переработки высоковязкой тяжелой нефти Ярегского месторождения, уникальной по своим свойствам, но труднодоступной по технологии извлечения.

На территории России из 100% запасов высоковязких нефтей и битумов промышленных категорий 14% приходится на Республику Коми, 19% – на Татарстан и 42% – на Западную Сибирь. Добыча аномально вязких нефтей составляет в настоящее время всего около 3% общей мировой добычи нефти [3]. Основная доля разведанных запасов нефти в Республике Коми категорий А+В+С₁ сосредоточена в девонских отложениях – 46,1% (из них 18,7% приходится на Ярегское месторождение высоковязкой нефти), а также в пермокарбонных отложениях – 29,8% [1].

Характеристика Ярегского месторождения

История открытия. Первое упоминание о Яреге как потенциально нефтеносном объекте относится к 1889–1890 гг., когда на Тимане работала экспедиция Геологического комитета во главе с будущим академиком Феодосием Николаевичем Чернышевым. За два года были исследованы Южный и Северный Тиман, проведены разведочные работы шурфами и речным буром на реках Ухте, Чути и Яреге. В августе 1889 г. из скважин № 3 и 4 в районе р. Ухты нефть стала выходить непрерывной струей. Район Ухты был признан промышленно нефтеносным. В 1906 г. Горный департамент выделил потенциально нефтеносные участки площадью 1200 десятин капитану Измайловского полка Ю.А. Воронову в районе притоков Ухты (реки Половинь-Йоль и Ярега) для организации промысла. В июле 1907 г. в районе Яреги экспедиция геолога П. Полевого с привлечением геолога Нобелевской нефтяной компании Ф.А. Андерсона обследовала течение р. Ухты и ее притоков Яреги и Чути [1, 4, 5].

В апреле 1932 г. известный нефтяник страны И.Н. Стрижов заложил первую скважину на «линии Стрижова», которую он наметил для размещения первоочередных скважин. Из первой же пробуренной скв. № 57 была получена нефть. Позже скв. № 62 с глубины 192–205 м дала 2 т густой нефти. Так было официально открыто Ярегское месторождение тяжелой нефти. Его первооткрывателем считается И.Н. Стрижов. После бурения в 1932–1933 гг. последующих скважин было подтверждено открытие месторождения тяжелой, высоковязкой нефти с повышенной плотностью при низком пластовом давлении. Запасы нефти на первом этапе оценивались около 40 млн. т [1, 6].

Специфика ярегской нефти. Нефть Ярегского месторождения оказалась уникальной. Ее плотность составила от 0,91 до 0,94 г/см³, очень высокая вязкость – до 16000 мПа·с, температура в пласте – 6–8 °С, низкое пластовое давление – 1,3 МПа. Количество нефти в 1 м³ породы составляет 200 кг. По оценке профессора А.А. Чернова, нефть Яреги принадлежит к типу нафтеноароматических [7] с предельно низким для тяжелых нефтей содержанием серы – от 0,84 до 1,17%. При возгоне эта нефть не дает бензина, но содержит от 8 до 12% керосиновых фракций. При вакуумной разгонке получается 5,7% газойля, 14,92% соляровых погонов, 5,37% веретенного масла и 21,79% автола [4, 8].

Согласно классификатору Геологического словаря [9], в дистиллятной части ярегской нефти преобладают нафтеновые и ароматические углеводороды. При этом количество последних к высшим фракциям возрастает. Нефть малопарафинистая: содержание твердого парафина ниже 1%, а асфальтосмолистых веществ достигает 20% и более. По условиям залегания подобная нефть приурочивается к зоне активного окисления.

Геологическое строение месторождения. В 1937 г. Н.Н. Тихонович после первых лет геологических исследований сформулировал сжатую и вместе с тем убедительную и фактически достоверную характеристику Ярегского месторождения, подчеркивая особенности тектоники, литологии и физико-химических свойств нефти III пласта, – главного концентратора тяжелой нефти [10]. Промышленная нефть залегает на глубинах 130–300 м. Уникальность Ярегского месторождения состоит в том, что кроме больших запасов нефти оно содержит огромные запасы нефтетитановой руды (50% общероссийских). Нефтетитановая руда представляет собой пропитанный нефтью песчаник (рисунок) [11, 12].

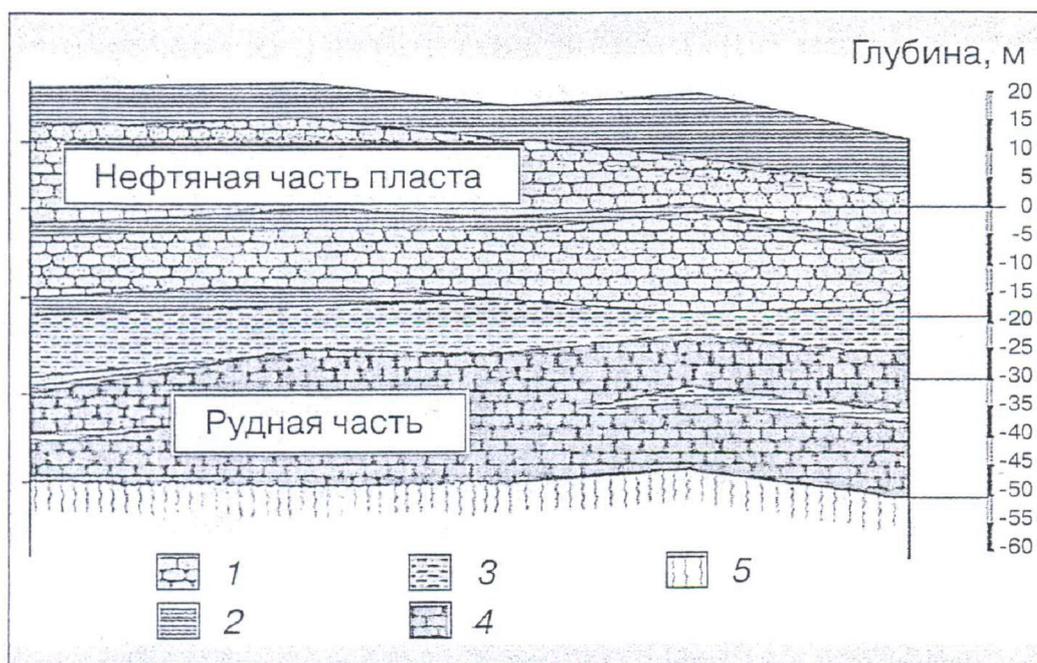


Рис. Разрез продуктивного пласта Ярегского нефтетитанового месторождения [12].

1 – песчаники нефтяные безрудные; 2 – аргиллиты; 3 – алевролиты; 4 – песчаники кварцевые нефтетитаносодержащие; 5 – метаморфические сланцы.

Площадь месторождения составляет 40 км². Месторождение III промысла представляет собой пластовую залежь, расположенную на своде и юго-востоке погружения Ухтинской антиклинальной складки. Тип месторождения принадлежит к категории структур, построенных на погребенных хребтах более древних пород. Характерной особенностью Ухтинской складки является присутствие вторичных структур форм на крыльях. Средний угол падения в области северо-восточного крыла, где расположена большая часть месторождения, составляет 1,5–2°, во вторичных структурах – не превышает 5°.

В геологическом строении основную роль играют D отложения, достигающие мощности 1000 м, структура которых описана ниже.

Фаменский ярус D₃

– ижемская свита (известково-доломитовая толща, глины, мергели, гипсоносные слои мощностью 130 м);

Франский ярус D₃ (известняки, песчаники с прослоями глин и мергели мощностью 110 м);

– сирачейская свита (известняки, мергели, глины мощностью 130 м);

– ветлосаянская свита (глина мощностью 150 м);

– доманиковая свита (известняки, переслаивающиеся с битуминозными глинами и битуминозными глинистыми сланцами, мощностью 80 м);

– нефтеносная свита:

▪ кубоидный горизонт (глины известковые и песчано-слюдистые);

▪ пестроцветный горизонт (*I нефтяной пласт* – глинистый слюдистый битуминозный песчаник, глины и мергели мощностью 159 м);

▪ песчано-глинистый горизонт (*II нефтяной пласт* – песчаник, пропитанный нефтью, глины мощностью 230 м);

Живетский ярус D₂

▪ туфоидный горизонт (туффиты, глинистые сланцы мощностью 70 м, *III – нефтяной пласт* – песок, содержащий тяжелую нефть, глина мощностью 142 м).

В геологическом строении промысловой площадки принимают участие только нижние горизонты, начиная с нефтеносной свиты, перекрытые ледниковыми отложениями. Отмечены неблагоприятные обстоятельства для проведения вертикальных стволов шахт: мощная толща рыхлых ледниковых отложений, присутствие пльвунов [13,10].

На начальных этапах промышленного освоения Яреги ученых и практиков интересовали вопросы трещинной тектоники как возможного фактора большей проницаемости нефти, роль диабазов, влияющих на коллекторские свойства нефти и коллекторские свойства III пласта, влияние микрофлоры вод на изменение в составе и свойствах нефти, содержание связанной воды в продуктивных песчаниках III пласта и др. Их изучение позволило оперативно подойти к реальным направлениям эксплуатации нефтяной залежи [13].

Технологии добычи

Особенности ярегской нефти (высокая плотность и вязкость) и геологического строения место-

рождения изначально обусловили необходимость разработки оригинальных технологий ее добычи.

В табл. 1 показано во временном разрезе (с 1932 г. по настоящее время) развитие технологии добычи ярегской нефти. Сравнение проведено по двум показателям – коэффициенту извлечения нефти (КИН) и максимальной годовой добыче нефти. Поверхностное опытное бурение показало, что из-за высокой вязкости ее добыча таким способом неэффективна: КИН составил всего 0,017, а добыча не превышала 1,4 тыс.т в год.

В 1934 г. научный руководитель Ухтинской экспедиции Н.Н.Тихонович предложил смелую идею – вести разработку месторождения Ярегской нефти шахтным способом. В 1937 г. началось строительство *первой в истории страны нефтешахты* [1]. Эта идея была не нова. Первая в мире нефтяная шахта была заложена в 1745 г. для добычи нефти на месторождении Пешельбронн (Франция). Затем этот метод нашел применение на ряде месторождений Германии, Японии, США, Канады, Южной Америки. В самом общем виде разработка месторождений нефти шахтным способом осуществляется дренированием пласта горными выработками и подземными скважинами с последующей добычей нефтесодержащих пород и отделением из них нефти [1, 14, 10].

В 1939 г. в первой шахте Яреги было пробурено четыре скважины, которые в сумме давали 80 т нефти в сутки. Поскольку из-за большой вязкости нефть не текла, ее перевозили в вагонетках на лошадиной тяге, затем переливали в бадьи и поднимали по стволу на поверхность. Такой была первая технология добычи ярегской нефти шахтным способом на естественном режиме истощения пластовой энергии. Началась война. Потребность в нефти в стране была так велика, что в 1942 г., несмотря на военные трудности, началось строительство на Яреге еще двух шахт.

К 1955 г. на трех шахтах удалось достичь максимальной годовой добычи 390 тыс. т, после чего наступил период ускоренного падения добычи. К концу 1960-х гг. извлечение нефти из недр на естественном режиме истощения пластовой энергии достигло минимального объема. Нужна была другая более совершенная технология. В 1968 г. начались опытные работы по внедрению термощахтного способа добычи, при котором пласт разогревался горячим паром, и тяжелая нефть становилась почти такой же подвижной, как обычная [15, 1, 4]. В 2012 г. исполнилось 40 лет с тех пор, как термощахтный метод добычи был внедрен в производство. За это время удалось сделать многое по его совершенствованию: сократить эксплуатационные затраты на добычу сырья, увеличить КИН до 0,6, довести добычу ярегской нефти до 500 тыс. т, а к 2012 г. – до 670 тыс. т в год.

В период эксплуатации месторождения было испытано около 10 систем термощахтной разработки. В итоге принято к эксплуатации три системы: двухгоризонтальная, одногоризонтальная и подземно-поверхностная. Во всех системах добыча нефти производится через подземные горизон-

*Использованные и перспективные технологии по добыче высоковязкой нефти Ярегского месторождения**

Годы	Содержание работ	Технологии добычи нефти	Достигнутый коэффициент извлечения нефти (КИН)	Максимальная годовая добыча, тыс.т
1932–1939	Опытные работы по испытанию технологии	Поверхностные скважины без воздействия на пласт	0,017	1,4
1941–1959	Добыча нефти	Шахтный способ на естественном режиме истощения пластовой энергии	0,04–0,06	390,0
1960–1967	Падение добычи нефти до минимального объема			
1968–1972	Опытные работы по испытанию технологии	Термошахтный способ: термическое воздействие на пласт горячим паром с давлением до 1,6 МПа тремя системами, отличающимися расположением нагнетательных скважин для закачки пара в пласт: двухгоризонтальной, одногоризонтальной, подземно-поверхностной	0,53	670
1973–2012	Добыча нефти		0,6	
Ближайшая перспектива	Опытные работы на Лыаельской площади Добыча нефти	Встречное термогравитационное дренирование пласта (ТГДП)	0,6	н.д.
Перспектива 2023–2024 гг.	Добыча нефти	Совершенствование подземно-поверхностной системы термошахтной разработки за счет: - увеличения протяженности подземных скважин с 300 до 1000 м - внедрения механизированного способа проходки горных выработок; - автоматизации технологических процессов по добыче нефти - строительства новых минишахт	0,6–0,7	3500 и более

*Составлено с использованием данных [15, 1, 16].

тальные и пологовосходящие скважины, пробуренные из горных выработок (добывающих галерей), пройденных в подошве продуктивного пласта. Отличаются системы только расположением нагнетательных скважин для закачки пара в пласт [16]:

- двухгоризонтальная система – закачка пара осуществляется через скважины, пробуренные из трех горных выработок под пластом. При этом обеспечивается наиболее равномерный охват пласта процессом теплового воздействия, но требуется большой объем проходки горных выработок, 240 м/га;

- одногоризонтальная – закачка пара ведется из скважин, пробуренных из добывающей галереи; недостаток системы – прогрев области пласта вблизи галереи, достоинство – снижение проходки горных выработок;

- подземно-поверхностная – закачка пара через скважины, пробуренные с поверхности на границу блока, т.е. вся система вынесена на поверхность; в зону забоя поверхностной нагнетательной скважины бурится подземная парораспределительная скважина, которая вместе с поверхностной образует единую систему нагнетания пара.

Оценка эффективности разработки за последние 12 лет по каждой системе показала, что по техническим и экономическим параметрам подземно-поверхностная система более предпочтительна для термошахтной разработки Ярегского месторождения. Поскольку темпы добычи нефти оказались в 1,5–2 раза выше, чем при других системах за счет высоких темпов закачки пара в начальный период разработки блока и обеспечения быстрого разогрева пласта [15].

Термошахтная разработка месторождения ведется на площадях, отработанных шахтным способом с огромным количеством старых скважин. Старые и вновь пробуренные скважины создают густую сеть, затрудняющую прогнозирование уровней добычи нефти. Ведется постоянная работа по совершенствованию термошахтной разработки. Основными ее направлениями «ПечорНИПИнефть» определил следующие [15]:

- *автоматизация технологических процессов* по добыче нефти (закрытая эксплуатация шахтных блоков, позволяющая сохранить тепло в пласте и снизить затраты на содержание горных выработок);

- *увеличение протяженности подземных скважин* с 300 до 800 м за счет ввода в действие с 2011 г. нового бурового оборудования;

- *замена буровзрывного способа на механизированный*: в 2011 г. на шахте №1 начались опытные работы по проходке горных выработок горно-проходческим комбайном с увеличением скорости проходки в пять раз;

- *строительство новых минишахт*, предложенных еще в 1989 г. специалистами «ПечорНИПИнефть». Каждая такая шахта разработывает отдельный шахтный блок площадью от 40 до 100 га, проходка горных выработок сокращается до 30–40 м/га, внедрение на минишахте автоматики сокращает затраты на ее содержание. Одной такой

минишахтой на Яреге можно вовлечь в разработку 11–30 млн. т нефти в зависимости от нефтенасыщенной толщины пласта.

Кроме намеченного совершенствования термошахтного способа добычи ярегской нефти на Лыаельской нефтеносной площади, примыкающей к Ярегскому месторождению, начались опытные испытания технологии термогравитационного дренирования пласта (ТГДП, в международной системе – SAGD). Суть технологии заключается в следующем: скважины бурятся парами – паронагнетательная над добывающей. Закачиваемый в верхнюю скважину пар нагревает пласт, снижая вязкость нефти, конденсируется и вместе с нефтью стекает к скважине, из которой производится добыча. В отличие от традиционного метода SAGD на Яреге бурение скважин производится навстречу друг другу. На Лыаельской площади пробурено пять пар скважин с длиной горизонтальной части ствола 1000 м. Предполагается в 2013 г. извлечь 22 тыс. т нефти. Как сообщила пресс-служба компании «Лукойл», проект встречного ТГДП реализуется впервые в мире (газета «Республика» от 27.02.2013 г.). Расчеты «ПечорНИПИнефть» подтверждают, что КИН по этой технологии может составить 0,60.

Эти две технологии – усовершенствованная термошахтная разработка и встречное ТГДП – на сегодня определены как наиболее перспективные. Их использование сможет обеспечить к 2024 г. намечаемый компанией ООО «Лукойл-Коми» уровень добычи ярегской нефти в объеме 3,5 млн. т и более.

Переработка нефти

Эффективность добычи и использования ярегской нефти определяется глубиной ее переработки и разнообразием получаемых продуктов. Ярегская нефть при любых способах переработки может обеспечить не более 9% светлых нефтепродуктов в виде дизельной фракции. Из этой нефти нельзя получать моторные топлива. Для ее переработки необходимы специальные способы. Смешивание этой нефти с любой другой по составу приводит к тому, что она практически теряет свои ценные качества и пополняет собой наиболее тяжелые и дешевые фракции. Но при специальных способах переработки она превращается в ценное сырье для производства таких продуктов, как дорожные битумы, хрупкие и лаковые битумы, трансформаторные, белые технические и медицинские масла, арктическое дизтопливо, низко застывающие газойли, мазулы и др. [17]. Переработка ярегской нефти началась одновременно с ее добычей на Ухтинском нефтеперерабатывающем заводе (УНПЗ). Сначала на атмосферно-трубчатой установке из ярегской нефти получали низко застывающие масла для Северной железной дороги. В конце 1940 г. было налажено производство полуасфальтита и вступила в строй установка по получению лакобитума.

В период войны 1941–1945 гг. ярегская нефть сыграла важную роль в обеспечении страны нефтепродуктами. Ее добыча в те годы составляла 80–83% от общего объема добычи нефти в республике. В короткие сроки из этой нефти было налажено

производство машинного, моторного и веретенного масла, солидола, нигрола и клембассы. Объем продукции из ярегской нефти увеличился с 7 до 15 видов, причем часть продукции выпускалась только на УНПЗ. За годы войны добыча ярегской нефти выросла с 78,7 тыс. т в 1941 г. до 172,5 тыс. в 1945 г. [1].

В те далекие годы была обеспечена комплексная переработка ярегской нефти со степенью глубины, которую позволяли технологии того времени. В начале 1950-х гг. на УНПЗ были введены новые установки: атмосферно-вакуумная, битумная и термического крекинга. По мере наращивания добычи нефти в республике структура перерабатываемой нефти менялась в сторону производства светлых нефтепродуктов, дизельного топлива и мазута. Добыча же ярегской нефти оставалась в среднем на уровне 500 тыс. т, а потому ее удельный вес в объеме перерабатываемой нефти неуклонно снижался. В последние годы на УНПЗ (ООО «Лукойл-Ухтанефтепереработка») перерабатывается нефть из трех «источников»: 60% – «усинская», нефть группы месторождений северной части Республики Коми и Ненецкого автономного округа; 30% – «тэбукская», нефть с большим содержанием светлых фракций месторождений центральной части Республики Коми и 10% – ярегская нефть.

Начавшаяся еще в условиях плановой экономики реструктуризация нефтеперерабатывающего завода была свернута в конце 1980-х гг. В годы перестройки на заводе удавалось лишь сохранять качество особо важных видов продукции, пользовавшихся устойчивым спросом, прежде всего, дорожного битума из ярегской нефти. Для строительства дороги в аэропорт «Домодедово» его покупала немецкая фирма «Виртген». Экспортные поставки осуществлялись в Литву, Латвию, Эстонию, Украину, в Казахстан – на строительство новой столицы республики Астана, в Монголию – для строительства международного аэропорта в Улан-Баторе [15].

Глубокую переработку тяжелой ярегской нефти со строительством комплекса по производству масел мощностью 140 тыс. т в год, в т.ч. трансформаторных, предусматривала намечавшаяся на 1985–1995 гг. программа реструктуризации УНПЗ, которая, к сожалению, не была реализована. Комплекс определялся программой как приоритетный. В то время Российская Федерация импортировала ежегодно только трансформаторного масла около 120 тыс. т на сумму более 40 млн. долл. Ситуация не изменилась до сих пор, в том числе и потому, что проблема получения высоколиквидных масел из ярегской нефти до сих пор не решена.

Перечень продуктов и эффективность глубокой переработки были представлены в проектной работе обоснования инвестиций комплексного освоения Ярегского нефтетитанового месторождения, выполненной в 1999–2001 гг. (табл. 2). Такой уровень переработки ярегской нефти обеспечивает высокую внутреннюю норму прибыли инвестиций – 26,1%, высокий индекс внутренней доходности – 1,75, срок окупаемости – около семи лет [17].

Таблица 2

Продукты глубокой переработки 500 тыс. т ярегской нефти, тыс. т

Виды	Объем	Виды	Объем
Масло:		Компоненты дизельного топлива	52
Трансформаторное	48	Мазут	124
Белое техническое	8	Вакуумный газойль низко застывающий	66
Белое медицинское	12	Полимерпласт	2
Промышленное	1	Нафтопласт	4
Битумы дорожно-строительные	174		

В настоящее время из всего перечня продуктов глубокой переработки ярегской нефти на УНПЗ производится мазут и после завершения реконструкции старой установки АВТ с 2013 г. возобновляется производство битумов различного назначения, отвечающих требованиям мировых стандартов. Новая установка АВТ позволит перерабатывать до 1 млн. т ярегской нефти в год, снизить выбросы в атмосферу (в т.ч. по диоксиду серы в четыре раза), перерабатывать все остатки атмосферной перегонки, получаемые с установки АТ-1.

Очевидно, что действующие технологии переработки уникальной нефти не обеспечивают выход высоколиквидных дорогостоящих товарных продуктов. Сравнение стоимости товарной продукции возможной глубокой и фактической переработки ярегской нефти показало, что потери от упущенной выгоды составляют 61% (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение глубокой и фактической переработки нефти в объеме 500 тыс. т по показателю товарной продукции, млн. руб. (в ценах 2000 г.)

Продукты переработки	Стоимость товарной продукции			
	глубокой переработки		фактической переработки	
	млн. руб.	%	млн. руб.	%
Масла (трансформаторное, белое техническое, белое медицинское, промышленное)	979	41,2	-	-
Вакуумный газойль (низко застывающий)	385	16,2	-	-
Компоненты дизельного топлива	333	14,0	-	-
Битумы	435	18,3	463	19,5
Мазут	198	8,9	464	19,5
Прочие продукты	45	2,0	-	-
Итого:	2375	100	927	39
Упущенная выгода			1448	61

Составлено с использованием данных [17].

Топливная специализация УНПЗ является результатом технической и экономической политики компании «Лукойл-Коми», направленной на получение бензина и дизтоплива, соответствующих мировым стандартам при переработке легкой и смешанных сортов нефти и битумов при переработке ярегской нефти. Задача была успешно решена, что позволило увеличить поставки этих продуктов на внешний рынок. В 2011 г. экспорт нефтепродуктов УНПЗ превысил экспорт сырой нефти в 1,5 раза, что, несомненно, является хорошим показателем для реализации стратегической цели постепенного перехода экономики Республики Коми от товарно-сырьевого к товарно-продуктовому использованию добываемых ресурсов [18].

Наряду с глубокой переработкой комплексное использование потенциала ярегской тяжелой нефти и лейкоксеновых песчаников (49% запасов титана России) связано (особенно песчаников) с сопутствующими еще до конца не оцененными проявлениями циркония, золота, редких земель, бериллия, тантала, ниобия. В ярегской нефти высока концентрация ванадия, которая изменяется в пределах от 44 до 66 и никеля – от 29 до 36 г/т [8]. Концентрации ванадия были обнаружены в золах ярегской нефти еще в далекие военные годы. Обычно в наиболее богатых ванадием тяжелых нефтях и асфальтитах его содержание доходит до 12%. Промышленная отработка технологий по извлечению сопутствующих минералов из тяжелой нефти и лейкоксеновых песчаников, например, гидроконверсии, предложенной Институтом нефтехимического синтеза РАН [8], позволит наиболее полно использовать ресурсы Ярегского месторождения.

Перспективы тяжелой нефти

Эпоха легкой нефти подходит к концу, и в последнее время в мире все больше обращают внимание на запасы так называемых некондиционных углеводородов, в том числе вязкой сернистой нефти и битуминозных пород. Нефтяные компании стран богатых тяжелой нефтью, работают над созданием технологий добычи и переработки такой нефти.

В России единственной компанией, которая решила инвестировать переработку тяжелой нефти, стала «Татнефть», которая в 2007 г. начала строительство Нижнекамского комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. При строительстве первого завода использованы 23 зарубежные и российские лицензионные технологические разработки. Опыт компании «Татнефть» может быть использован на Ухтинском НПЗ при необходимости его расширения в связи с намечаемым увеличением добычи ярегской нефти до 3,5 млн. т и более [19].

Основные факторы роста добычи ярегской нефти включают:

- *кластерный* – сформировавшийся в Ухте, Яреге, Сосногорске нефтегазовый кластер включает не только объекты добычи, переработки, транспорта, но и научно-исследовательские организации. Именно объединенными усилиями науки Ухтинского государственного технического университета, ПечорНИПИнефть и инженеров Яреги разрабаты-

вались технологии добычи ярегской нефти по принципу «исследование – опытные работы на месторождении – добыча – исчерпание способа», что в конечном итоге позволило разработать наиболее оптимальные для ярегской нефти способы добычи и обеспечить в ближайшие годы значительный рост ее объемов. С реализацией Ярегского горно-химического комплекса на основе переработки нефтетитановых руд в республике будет реализован по настоящему комплексный проект с глубокой переработкой добываемого сырья и получением целого спектра готовой продукции, в том числе нанопродуктов;

- *организационный* – наличие единого собственника Ярегского нефтетитанового месторождения нефтяной компании «Лукойл-Коми» и компаний ОАО «Ярегская нефтетитановая», ЗАО «Битран», ОАО «Ярега Руда» обеспечивает комплексное решение задач добычи и переработки нефти и титановой руды с учетом геологического строения нефтетитановой залежи;

- *ресурсный* – несмотря на многолетнюю добычу, потенциал месторождения по оптимистическим оценкам составляет 119 млн. т извлекаемой нефти [3];

- *технологический*: а) *в добыче* – автоматизация и механизация поверхностно-подземного термощахтного способа, встречное термогравитационное дренирование пласта и перспективное строительство минишахт; б) *в переработке* – переход с топливно-битумной на топливно-масляно-битумную глубокую переработку малопарафинистой и низкосернистой тяжелой нефти;

- *государственная поддержка* – Ярегское месторождение с трудноизвлекаемыми запасами тяжелой нефти подпадает под закон об «обнулении» налога на добычу полезных ископаемых, что сыграло определенную роль в решении компании «Лукойл» увеличить добычу и переработку тяжелой нефти.

Таким образом, для роста добычи ярегской нефти до 3,5 и более млн. т имеются вполне обоснованные предпосылки. Среди намерений по их реализации отметим следующие заявления:

- создание специализированного научно-производственного центра по отработке технологий и технических средств с использованием полигонов Ярегского и Усинского месторождений для эффективного освоения ресурсов высоковязких нефтей северо-восточной части России (мнение главы ОАО НК «Лукойл» В.Ю. Алекперова) [13];

- переработка ярегской тяжелой нефти за рубежом при условии покупки НПЗ и обеспечения дальнего транспорта нефти с ее подогревом (заявление ОАО НК «Лукойл» [15]);

- вариант строительства завода по глубокой переработке ярегской нефти непосредственно на месте добычи (планы Ярегской нефтетитановой компании);

- вариант производства синтетической нефти как альтернативы расширению УНПЗ по глубокой переработке Ярегской нефти (интервью зам. директора «ПечорНИПИнефть» И.В. Герасимова) [15].

Наиболее реальным и предпочтительным с позиции региональных интересов представляется вариант расширения УНПЗ для переработки увеличенных объемов ярегской нефти по топливно-масляной схеме с учетом экологических ограничений, связанных с размещением завода в черте г. Ухты.

Заключение

Смена парадигмы регионального развития в стратегии развития экономики России для регионов с товарно-сырьевой направленностью, таких как Республика Коми, означает повышение эффективности использования природных ресурсов за счет глубокой и комплексной переработки.

Обработка различных технологий добычи ярегской тяжелой нефти в течение длительного времени по техническим и экономическим параметрам сформировала наиболее предпочтительную подземно-поверхностную систему термошахтной разработки, повышающую темпы добычи нефти в 1,5–2 раза по сравнению с другими термошахтными системами и систему добычи нефти с бурением встречных скважин в одной вертикальной плоскости по технологии ТГДП.

Эффективность добычи и реализации ярегской нефти напрямую зависит от глубины переработки. Существующая технология переработки не использует возможности этого ценного сырья. Упущенная выгода по товарной продукции, по нашим оценкам, составляет 61% от аналогичного показателя при глубокой переработке. Развитие перерабатывающих производств, обеспечивающих глубокую переработку, будет способствовать маркетинговой диверсификации – выпуску продукции с большой вариантно-рыночной сбыта, укреплению рыночных отношений и повышению конкурентоспособности.

Литература

1. Герасимов Н.Н., Мельникова Н.В., Иевлев А.А., Тимонина Н.Н. Большая нефть Тимано-Печоры. Сыктывкар: Коми респ. тип., 2009. С.26,44,76–78, 89, 128, 193–194, 204–205, 277–278, 292–295.
2. Громов А.И. Новое в стратегическом планировании в энергетике России: от прогнозных сценариев к целевой модели развития // Энергетическая политика. 2010. №1. С.51–61.
3. Нефть новой России. Ситуация, проблемы, перспективы / Под общей редакцией В.Ю.Алекперова. М.: Древлехранилище, 2007. 688 с.
4. Гуменюк А.С. На Яреге был найден ключ к покорению тяжелой нефти // Регион. 2004. № 6. С.30–38.
5. Гуменюк А.С. Ухтинская «Инновационная долина» // Регион. 2012. № 4. С.10–14.
6. Тихонович Н.Н. Нефтяные месторождения Ухто-Печорского края // Междунар. XVII геол. конгресс. М.-Л., 1937. С.21–22.
7. Чернов А.А. О плане разведочного бурения на нефть и газ в 1959–1965 гг. // Народное хозяйство Коми АССР. Бюл. техн.-эконом. информации. 1958. №12. С.16–18.
8. Комплексная переработка тяжелых высоковязких нефтей и нефтяных остатков с извлечением ванадия, никеля и молибдена/ М.Я.Висалиев, М.Я.Шпирт, Х.М.Кадиев и др.// Химия твердого тела. 2012. №2. С.32–39.
9. Геологический словарь. Т.2. М., 1973. С.16.
10. Тихонович Н.Н. Геологическое строение Ярегского нефтяного месторождения (рукопись) (ВНИГРИ), 1937.
11. Кувшинова Н., Москвин А. Битумы заждались. России пора вспомнить про невостребованные десятки миллиардов тонн углеводородного сырья // Нефть России. 2003. № 3. С.34–37.
12. Пранович А.А., Власенко В.И. Комплексный подход к освоению Ярегского нефтетитанового месторождения // Горный журнал. 2007. №3. С.69–70.
13. Максимова Л.Д., Ковалев А.Г., Вашуркин А.И. Статистическая оценка коллекторских свойств Третьего пласта Ярегского месторождения // Разработка нефтяных месторождений и гидродинамика пласта. М., 1966. С.22–30 (Труды ВНИИ. Вып. 44).
14. Кремс А.Я., Здоров С.Ф., Бондаренко С.М., Адамов А.И. Шахтная разработка нефтяных месторождений. М., 1960. 274 с.
15. Герасимов И.В. Большое будущее Яреги. О комплексном развитии Ярегского нефтетитанового месторождения // Регион. 2012. № 9. С.7–10.
16. Коноплев Ю.П., Алабумкин А.А., Гуляев В.Э. Опыт и перспективы развития термошахтной разработки Ярегского месторождения высоковязкой нефти // Высоковязкие нефти и природные битумы: Материалы Международной научно-практической конференции. Казань: Изд-во ФЭН, 2012. С.74–77.
17. Обоснование инвестиций в комплексное освоение Ярегского нефтетитанового месторождения. (С-Петербург, Москва, 2000 г.).
18. Формирование и использование топливно-энергетических ресурсов. Информационно-аналитический бюллетень № 37-108-90/10 Комитат. Сыктывкар, 2012. 24 с.
19. Абсолютно все, что вы хотели бы узнать о тяжелой нефти. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rspenergy.ru/main/content.asp?art_id=4737

Статья поступила в редакцию 04.03.2013.

УДК 639.2.05

ИНТЕГРАЦИЯ В РЫБНОЙ ОТРАСЛИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЕ РАЗВИТИЯ

И.Д. КОТЛЯРОВ

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, г. Санкт-Петербург
ivan.kotliarov@mail.ru

Рассмотрены варианты формирования спроса на рыбную продукцию на национальном рынке. Показано, что наиболее эффективным инструментом решения этой задачи является развитие логистической инфраструктуры и интеграция участников рыбной отрасли.

Ключевые слова: интеграция, аутсорсинг, рыбная отрасль

I.D.KOTLYAROV. INTEGRATION IN FISH SECTOR AS AN INSTRUMENT OF ENSURING ITS DEVELOPMENT

Variants of formation of demand for fish production in the national market are considered. It is shown that the most effective instrument of the solution of this problem is development of logical infrastructure and integration of participants of fish sector.

Key words: integration, outsourcing, fish sector

Потребность в восстановлении отечественной рыбной отрасли после резкого спада, связанного с переходом нашей страны к новым социально-экономическим условиям в 90-х гг. XX в., обуславливается рядом причин:

- необходимость в самостоятельном эффективном использовании биоресурсов морской экономической зоны Российской Федерации;
- обеспечение экономического присутствия Российской Федерации как в морской экономической зоне, так и акватории Мирового океана;
- обеспечение продовольственной безопасности нашей страны (эта задача имеет большое значение, так как в свете непрерывного роста цен на зерно и связанного с ними роста на продукцию птице- и животноводства население России может проявить интерес к альтернативным источникам белка);

- поддержание приемлемого уровня социально-экономического развития тех областей России, для которых рыбная ловля традиционно является важной или ведущей отраслью региональной экономики.

В свете этого руководство России принимает меры по поддержке рыбохозяйственной отрасли. Однако, к сожалению, эти меры до недавних пор носили точечный, а не комплексный характер, поскольку были направлены в первую очередь на поддержку добычи рыбы (например, речь шла о программах лизинга рыболовных судов). Тогда как устойчивое развитие рыбной отрасли будет возможно только в том случае, если будет осуществляться поддержка ее как единого целого. Речь должна идти о формировании цепочки «вылов –

переработка – логистика – сбыт», а в конечном счете – о формировании на национальном рынке спроса на продукцию рыбного промысла и создании эффективного механизма движения этой продукции от вылова по всем стадиям переработки, транспортировки и сбыта до конечного потребителя. Очевидно, что этот спрос должен быть устойчивым (а не зависеть, например, от разовых акций по его поддержке), а условия оплаты продукции и ее цена должны быть привлекательными для рыболовческих предприятий. Без создания этого спроса улов, добытый новыми траулерами, построенными при государственной поддержке, уйдет в те страны, где спрос на него есть (Норвегию – в случае Европейского Севера нашей страны, Китай, Корею и Японию – в условиях Дальнего Востока), вместо того, чтобы снабжать своей продукцией отечественных рыбопереработчиков.

Иными словами, системного сдвига в рыбной отрасли не произойдет, лишь обновятся основные фонды рыболовческих компаний (что, парадоксальным образом, позволит иностранным перекупщикам эффективнее эксплуатировать морские биоресурсы нашей страны при фактической государственной поддержке со стороны России).

В каком же звене приведенной выше цепочки должен формироваться спрос на рыбу и морепродукты?

Технологическая специфика российского рыболовного флота такова, что первичная переработка значительной части улова осуществляется прямо на судне, где производится готовый к поставке на рынок продукт – замороженная рыба [1]. Этот продукт может быть прямо в море продан ино-

странным закупщикам по ценам, близким к мировым. Поставка же его потенциальным российским потребителям затруднена. С одной стороны, в настоящее время отсутствует полноценная логистическая инфраструктура, которая позволяла бы поставлять его в розницу (поскольку регионы потребления рыбы находятся на значительном удалении от регионов ее производства). С другой стороны, использование этого продукта в качестве сырья на рыбокомбинатах нерентабельно. Кроме того, представители отечественной рыбоперерабатывающей отрасли жалуются на низкое качество продукции российских рыбаков, не соответствующее требованиям производственного процесса, из-за чего закупка сырья для переработки производится за рубежом. Таким образом, рыбаки лишены стимулов (и ресурсов) для того, чтобы своими усилиями обеспечивать спрос на свою продукцию в России.

Очевидно, что в условиях недовольства качеством российской рыбы отечественные рыбопереработчики также не будут генерировать спрос на нее. Логистические компании, включенные в описанную выше цепочку, имеют иной профиль деятельности – задачей логистики традиционно считается не формирование спроса, а логистическое обслуживание его удовлетворения.

Остается сбытовое звено, в котором можно выделить розничную торговлю и дистрибуцию (опт). Что касается чистой дистрибуции (отделенной от производителя), то она, как и логистика, не столько формирует спрос, сколько обеспечивает обслуживание розничных продаж. По этой причине приоритет в стимулировании сбытового звена отдавался рознице – руководство страны совершает определенные шаги, чтобы создать со стороны нее спрос на рыбопродукты. Речь идет о возрождении сети рыбных магазинов «Океан» [2]. Тем не менее, вопрос о рентабельности специализированных рыбных магазинов в условиях эффективной многопрофильной сетевой розницы не исследован (профессионалы рыбного рынка скептически оценивают перспективы такой деятельности [3]), а снабжение этих магазинов также сталкивается с логистическими проблемами [2]. Сами же эти магазины пока слишком малочисленны. Это означает, что на настоящий момент розница не в состоянии генерировать спрос на рыбопродукты, а даже если бы она и могла это делать, в нашей стране все равно отсутствуют транспортно-складские мощности по доставке рыбы от места вылова (Дальний Восток, Мурманск) до мест концентрации потенциальных потребителей (европейская часть России). И хотя в настоящее время делаются попытки снизить остроту транспортной проблемы (в том числе и за счет использования Северного морского пути [4]), она пока далека от решения.

Все вышесказанное позволяет указать на две проблемы, препятствующие развитию отрасли:

- В настоящее время участники рыбной отрасли разобщены, а их интересы противоположны. Из-за этого у них нет ни стимулов (из-за различий в интересах), ни ресурсов (из-за разобщенности и малых размеров участников отрасли) для само-

стоятельного формирования и эффективного удовлетворения спроса на рыбу отечественного промысла со стороны российского потребителя;

- Отсутствует технологическая (транспортная) связь между производством и сбытом. По этой причине важным шагом по развитию рыбной отрасли является привлечение инвесторов в рыбную логистику, которая бы позволила связать воедино производство и сбыт рыбных продуктов [5]. Формирование эффективно функционирующего канала доставки, обеспеченного всеми необходимыми техническими средствами для хранения и транспортировки рыбы и исключающего из цепочки поставки посредников, смогло бы создать технические условия для удовлетворения спроса и тем самым способствовало бы его формированию.

Важно понимать, что эти проблемы тесно связаны друг с другом. Создание логистической инфраструктуры под силу только крупному игроку рынка со значительными ресурсами, обеспеченному собственной рыбой (чтобы иметь возможность своими силами заполнить хотя бы часть транспортных мощностей), а также со своей дистрибуцией (чтобы контролировать всю сбытовую цепочку и сохранять маржу внутри компании). Появиться такой игрок внутри отрасли может только за счет вертикальной интеграции уже существующих участников. Если же организовать такой транспортный канал пожелает внешняя по отношению к отрасли компания (например, логистическая), то ей будут нужны гарантии окупаемости (т.е. стабильных и больших заказов на использование ее мощностей). Такие гарантии сможет предоставить только крупный участник рыбной отрасли, т.е. даже в этом случае налицо потребности в интеграции отрасли.

В свою очередь, отсутствие канала доставки продукции до потребителя ведет к консервации нынешней ситуации разобщенности, когда каждый участник отрасли преследует свои узкие интересы.

Таким образом, можно говорить о двух путях решения этих проблем:

- Приоритет отдается созданию логистической инфраструктуры (на основе государственной поддержки, поскольку в нынешних условиях уровень риска такого проекта неприемлем для частных компаний из-за отсутствия гарантии спроса на услуги). Оператор этой инфраструктуры в дальнейшем мог бы организовать сотрудничество с ключевыми игроками отрасли, чтобы загрузить свои мощности (т.е. осуществил бы мягкий вариант интеграции), или же сформировал бы вертикально интегрированную компанию за счет поглощения рыболовных и дистрибьюторских компаний. При наличии же достаточных финансовых ресурсов такой оператор мог бы своими силами создать с нуля собственные рыболовные и сбытовые подразделения;

- В первую очередь создается вертикально интегрированная компания, контролирующая вылов биоресурсов, переработку и дистрибуцию. И уже в ответ на ее потребности создается логистическая инфраструктура. В этом варианте инвестировать в инфраструктуру вполне может частный бизнес без

поддержки государства, поскольку уровень рисков существенно снижается.

Руководством нашей страны была сделана попытка пойти по первому пути. В частности, при участии ФГУП «Национальные рыбные ресурсы» создана специализированная логистическая компания «Рыбтранссервис», которая должна была построить 15 холодильных терминалов в ключевых городах России, а также исключить посредников из транспортно-сбытовой цепочки путем организации прямых поставок рыбопродукции в розничные сети [6]. Последнее предполагало, что «Рыбтранссервис» должен выполнять не только транспортные, но и закупочно-сбытовые функции (и самостоятельно генерировать спрос на рыбную продукцию, о котором говорилось выше). По сути дела, государство собиралось создать естественного монополиста на рынке рыбных перевозок и рыбной дистрибуции. Во многом это оправданно, так как поставленная задача требует от «Рыбтранссервиса» концентрации ресурсов и наличия рыночной власти. Кроме того, речь шла и о строительстве для «Рыбтранссервиса» и рыболовецких судов, что позволило бы ему обеспечить себя рыбой собственного производства. Очевидно, что такая стратегия создания мощного логистического оператора с последующей интеграцией в нем рыболовецкого, транспортного и сбытового направлений способствовала бы решению обеих описанных выше проблем отрасли.

К сожалению, насколько можно судить, из-за невыгодной ценовой конъюнктуры в 2010 г. «Рыбтранссервису» не удалось обеспечить требуемый объем закупок и поставок [7], а обширные планы по формированию логистической инфраструктуры были плавно свернуты, что не может не вызывать досаду. Можно предполагать, что провал «Рыбтранссервиса» связан с тем, что не был детально продуман и внедрен механизм его сотрудничества с другими участниками отрасли. Иными словами, не было сделано заметных шагов по интеграции хотя бы части отраслевых игроков вокруг «Рыбтранссервиса» и координации их интересов.

Укажем, что если в будущем государство снова вернется к вопросу создания такой инфраструктуры (самостоятельно или на основе механизма государственно-частного партнерства), то решения потребуют следующие вопросы:

- Учет интересов инвесторов в логистическую закупочно-сбытовую структуру (ЛЗСС), которым должен быть гарантирован возврат инвестиций. Очевидно, что эта ЛЗСС оказывается в достаточно сложном финансовом положении – с одной стороны, она инвестирует значительные средства в строительство инфраструктурных объектов, с другой стороны, ей необходимо оплачивать закупки рыбной продукции у рыболовецких предприятий, наконец, в-третьих, поставки продукции в торговые сети будут осуществляться только на условиях платежа;

- Сырьевое обеспечение рыбокомбинатов (чтобы выловленная рыба не целиком передавалась в логистическую систему, а в достаточном для

производственных целей объеме поступала на рыбоперерабатывающие предприятия);

- Учет интересов рыболовных компаний, которым бы гарантировались достаточные финансовые поступления. Рыболовы справедливо опасались того, что ЛЗСС навяжет им закупочные цены на их продукцию, которые не будут соответствовать их потребностям, а также будет диктовать цены на хранение товара на своих складах, а в конечном счете – попытается установить полный контроль над отраслью.

Последний пункт особенно важен. Безусловно, опасения рыболовов во многом оправданны. Однако, на наш взгляд, приход в отрасль поддерживаемого государством, но при этом рыночного игрока, вокруг которого эта отрасль могла бы сплотиться, является скорее благоприятным событием, хотя, разумеется, отдельным компаниям изменение отраслевой ситуации может показаться некомфортным.

В этой связи эффективной могла бы оказаться следующая схема:

- Изменяется механизм распределения квот на вылов биоресурсов – часть из них выделяется ЛЗСС, которая заключает долгосрочные договоры на обслуживание этих квот с рыболовными компаниями, обновившими свой флот при государственной поддержке или самостоятельно (при помощи такого механизма можно создать стимулы к обновлению флота и, как следствие, к внедрению современных технологий рыбной ловли);

- ЛЗСС авансирует деятельность рыболовецких компаний-партнеров, в обмен получая от них гарантии определенного уровня цен (этот аспект очень важен – закупочные цены не диктуются ЛЗСС, а учитывают интересы всех участников сделки);

- Квоты прочим рыболовецким компаниям выделяются только при условии, что у них есть договоры на поставки улова (в определенной пропорции от квоты) на отечественные рыбокомбинаты. Очевидно, что такой договор возможен только в случае согласия рыбокомбината с качеством поставляемой продукции (которое, как описано выше, пока вызывает нарекания). Это создало бы для рыболовов стимул к повышению качества. Схема взаимодействия рыбокомбинатов с этими компаниями аналогична – рыбокомбинат авансирует работу рыболовов, а взамен получает от них гарантию отпускных цен (возможно, с гарантированным уровнем рентабельности). При помощи такого механизма, на наш взгляд, можно было бы добиться решения двух задач: с одной стороны, у рыбаков возник бы стимул сдавать улов на российские предприятия, а не продавать его в море иностранцам (поскольку без договоров с рыбокомбинатами квоты не предоставляются), а с другой стороны, рыбокомбинаты обеспечили бы конкуренцию за улов с ЛЗСС, что избавило бы рыбаков от ценового давления со стороны ЛЗСС;

- Если у рыболовецких компаний образовался излишек продукции, он может быть сдан в систему ЛЗСС, которая гарантирует им закупочные цены не

ниже тех, которые предоставляют рыбокомбинаты (средний уровень по региону).

В этой модели создание логистической инфраструктуры тянет за собой интеграцию отрасли. По сути дела, речь могла бы идти о том, что рыбооловецкие компании формируют «мягкую» вертикально-интегрированную структуру либо с ЛЗСС, либо с рыбокомбинатами, которые передают им на аутсорсинг функцию вылова биоресурсов для сырьевого обеспечения своей деятельности (т.е., если можно так выразиться, рыбооловецкие компании переходят от полноценной самостоятельной хозяйственной деятельности к промысловому обслуживанию рыбоперерабатывающей промышленности). Отметим, что специалистами уже предлагалась интеграция предприятий промышленного рыболовства в вертикальные структуры как инструмент повышения эффективности их деятельности [8]. Однако построение традиционной вертикальной структуры требует больших инвестиций со стороны компании, инициирующей интеграцию, а также усложняется сопротивлением со стороны поглощаемых предприятий. Интеграция на основе аутсорсинга таких затрат не требует и сопротивление ей слабее, так как включаемые в структуру предприятия утрачивают не юридическую и организационную, а лишь часть рыночной самостоятельности. Разумеется, даже частичная утрата самостоятельности связана для рыбооловецких компаний с определенными неудобствами, однако взамен они получают гарантированный спрос на свою продукцию, устраивающие их закупочные цены и авансирование своей деятельности. Иными словами, сокращение независимости и уменьшение доходов компенсируется соответствующим снижением уровня риска.

Сходные по содержанию модели успешно внедрены в АПК [9, 10], и, по нашему мнению, они могут оказаться полезными и в рыбном хозяйстве. Хотя аутсорсинг для сельского и рыбного хозяйства в значительной степени является экзотикой, однако он представляет собой эффективный инструмент оптимизации хозяйственной деятельности, использование которого в этих отраслях, достаточно перспективно.

Естественным следствием этой модели является укрупнение рыбооловственных предприятий, что приведет к повышению эффективности их деятельности и возможности аккумулирования ресурсов для финансирования своего развития (обучения персонала, строительство новых судов и т. д.).

Хотя напрямую к данной модели этот вопрос не относится, однако ЛЗСС, в случае ее организации, могла бы взять на себя также финансирование создания и продвижения национальных зонтичных марок рыбной продукции (по аналогии со знаменитой маркой Norge), что существенно упростило бы сбыт поставляемых ЛЗСС на рынок товаров. Эти марки могли бы предоставляться в пользование тем рыбокомбинатам, с которыми ЛЗСС сочтет возможным подписать договоры о сотрудничестве. Альтернативой такой марки (в отсутствие ЛЗСС) может быть добровольная сертификация продукции в рамках саморегулируемой организации рыбопе-

реработчиков. Однако важно, чтобы используемый механизм сертификации стал общепризнанным как внутри отрасли, так и среди потребителей. Разговоры о такой сертификации ведутся уже достаточно давно, однако каким-либо результатом пока не завершились.

Последний момент, который хотелось бы затронуть в данной работе, не следует забывать о том, что наряду с добычей природных морских биоресурсов источником сырьевого обеспечения рыбопереработки является также их искусственное разведение. Именно оно позволило трансформировать рыбную отрасль Норвегии, а особенно впечатляющим является пример Китая, где за период 1984–2004 гг. продукция рыб и беспозвоночных увеличилась в 12,5 раз, а в 2004 г. общий объем искусственно выращенных гидробионтов превысил вылов 2,3 раза [11]. По этой причине государственная поддержка сырьевой составляющей отрасли должна распространяться не только на промысел рыбы, но и на ее разведение. Эта поддержка могла бы также происходить по схеме аутсорсингового взаимодействия ЛЗСС (или рыбокомбинатов) с рыбными хозяйствами. Речь идет о формировании долгосрочного партнерства ЛЗСС с рыбными хозяйствами, при котором ЛЗСС под гарантии будущих поставок по фиксированному ценам осуществляла бы частичное авансовое финансирование деятельности рыбных хозяйств, а они, в свою очередь, занимались бы именно теми видами аквакультуры, в которых заинтересована ЛЗСС.

Отметим, что в настоящее время участники рынка, не ожидая государственной поддержки, прилагают усилия по формированию вертикальных структур, призванных включить в себя вылов биоресурсов, переработку и дистрибуцию [12]. Можно предположить, что создание таких компаний повлечет за собой и организацию необходимой логистической инфраструктуры – но не силами самих компаний, а на основе аутсорсинга. Иными словами, логистические операторы, увидев потребность в такого рода услугах, будут инвестировать в создание необходимых транспортных и складских мощностей с целью обслуживания транспортных потребностей рыбных компаний на основе долгосрочного партнерства с ними. В этом случае можно будет говорить об использовании второго пути решения проблем рыбной отрасли, когда интеграция потянет за собой логистику.

Литература

1. Царева С.В. Роль государства в повышении инвестиционной привлекательности промышленного рыболовства России // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. № 1. С. 149–153.
2. Воронина К. Краткосрочная ностальгия // Эксперт Северо-Запад. 2009. № 48. Доступно онлайн по адресу: http://www.expert.ru/northwest/2009/48/rybnyu_reteyl/. Проверено 14.01.2011.
3. «Океан» на безрыбье // Эксперт Северо-Запад. 2009. № 24. Доступно онлайн по ад-

- ресу: <http://www.expert.ru/northwest/2009/24/ocean/>. Проверено 14.01.2010.
4. Пономарев В. Рыбный день // Эксперт Online. – 07.09.2011. Доступно онлайн по адресу: <http://expert.ru/2011/09/7/ryibnyj-den/>. Проверено 01.02.2013.
 5. *Правильная логистика – ключ к развитию рынка* // Рыбное хозяйство. 2012. № 3. С. 11.
 6. Михайлов А. Рыба ждет // Приложение к газете «Коммерсантъ». 2010. № 200. Доступно онлайн по адресу: <http://www.kommersant.ru/doc.aspx?DocsID=1520850>. Проверено 14.01.2011.
 7. Корепанова С. «Рыбтранссервису» не удалось закинуться на сеть // Gudok.ru: транспортный портал. – 06.09.2010. Доступно онлайн по адресу: http://www.gudok.ru/transport/zd/?pub_id=361139. Проверено 01.02.2013.
 8. Жулева О.И. Интеграция предприятий рыбной промышленности в рациональные отраслевые корпоративные образования. Автореф. дис...уч. ст. канд. эк. наук. Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2009.
 9. Артюхова М. Молочные реки «Вимм-Билль-Данна» – сырье для заводов и живые деньги для сельчан // Башинформ. 23.09.2008. Доступно онлайн по адресу: <http://www.bashinform.ru/podrob/170461/>. Проверено 14.01.2011.
 10. Москаленко Л. Мировая мода из Вологды // Эксперт. 2010. № 50. С. 36–42.
 11. Болтачев А.Р. Аналитический обзор современного состояния мирового рыболовства и аквакультуры // Морской экологичный журнал. 2007. № 4. Т. VI. 2007. С. 5–17.
 12. Инкижинова С. Рыбопереработчики выходят в море // Эксперт. 2012. № 10. Доступно онлайн по адресу: <http://expert.ru/expert/2012/10/ryibopererabotchiki-vyihodyat-v-more/>. Проверено 01.02.2013.

Статья поступила в редакцию 01.02.2013.

ХРОНИКА

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «БИОРАЗНООБРАЗИЕ ЭКОСИСТЕМ КРАЙНЕГО СЕВЕРА: ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ, МОНИТОРИНГ, ОХРАНА»

С 3 по 7 июня 2013 г. в г. Сыктывкар (Республика Коми) состоялась Всероссийская научная конференция «Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана». Инициатор ее проведения – Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. Соучредителями выступили Ми-

нистерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, Управление Росприроднадзора по Республике Коми, Коми отделение Русского ботанического общества. Финансовую поддержку мероприятию оказал Российский фонд фундаментальных исследований.

Научное мероприятие, посвящённое обсуждению экологических проблем Севера, стало логическим продолжением Всероссийской конференции «Биоразнообразие растительного покрова Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана», состоявшейся в 2006 г. на базе Института биологии Коми НЦ УрО РАН. На конференции 2013 г. собрались ученые, которые проводят исследования в разных областях современной биологии и экологии,



Открытие конференции.

представители высших учебных заведений, специалисты в области охраны окружающей среды.

Задача участников конференции – подвести промежуточные итоги изучения экосистем Крайнего Севера, расширить научные контакты специалистов, наметить программу дальнейших совместных комплексных исследований. Были рассмотрены проблемы выявления и сохранения биологического разнообразия на различных уровнях его организации, типизации и классификации растительности и почв, охраны редких видов, сообществ и ландшафтов тундровой зоны, а также последствий антропогенных изменений северных экосистем. Участники конференции обсудили особенности, возможности и перспективы использования методов дистанционного зондирования и картографирования для изучения природы Заполярья; были рассмотрены вопросы экологического образования в северных районах.

В конференции приняли очное и заочное участие более 200 ученых, представляющих 96 научных и учебных учреждений. Гео-



Участники конференции.

графия участников объединяет 25 городов Российской Федерации (Архангельск, Апатиты, Вилуйск, Екатеринбург, Казань, Киров, Кировск, Красноярск, Москва, Мурманск, Нарьян-Мар, Нерюнгри, Новосибирск, Норильск, Петрозаводск, Пущино, Санкт-Петербург, Сургут, Сыктывкар, Томск, Тюмень, Ханты-Мансийск, Южно-Сахалинск, Якутск, Ярославль) и Литвы (Вильнюс). С докладами выступили ведущие ученые из академических институтов РАН, представители университетов, ботанических садов, заповедников и других организаций. Среди них 73 кандидата и 22 доктора наук. Электронный сборник материалов размещен на сайте Института биологии Коми НЦ УрО РАН: <http://ib.komisc.ru/add/conf/tundra/>.



Н.А.Константинова (Полярно-арктический ботанический сад-институт, Кировск) – д.б.н., ведущий специалист-биолог.

саний, иллюстрирующие типологические построения для характеристики растительности тундровой зоны, а также флористические списки локальных флор и тем более фаун, отражающих таксономическое разнообразие Арктики. Недостаточно внимания уделяется развитию, кадровому и техническому оснащению коллекционных фондов растений, животных и грибов Крайнего Севера. Остается слабо разработанной классификация растительных сообществ, не решены проблемы типизации их горизонтальной структуры, слабо развита типология экотопов. Очень мало крупномасштабных карт почвенно-растительного покрова. Очевидна необходимость работ по флористическому и геоботаническому районированию. При исследованиях не всегда проводится четкая привязка ключевых участков и пробных площадей к картографическим материалам. Явно недостаточно внедряются современные методы исследований – дистанционное зондирование, ГИС-технологии. Все это снижает возможность сравнения и обобщения результатов, полученных разными специалистами. Необходимо интенсифицировать биогеоценологические исследования, направленные на комплексную оценку биологических ресурсов. Из-за дефицита финансирования в Арктике почти утрачена когда-то развитая сеть долговременных стационаров, которые могли бы быть опорными пунктами мониторинга биоразнообразия, что снижает возможности оценки состояния экосистем и прогнозирования их динамики.

В последние десятилетия в разных регионах Российской Арктики резко возросли и продолжают увеличиваться антропогенные нагрузки на экосистемы, что, прежде всего, связано с нерациональным использованием природных ресурсов. В условиях повсеместного развития многолетних мерзлых пород, уязвимые к вмешательству человека биогеоценозы Крайнего Севера, под воздействием техногенного пресса часто деградируют вплоть до полного разрушения. Темпы их естественного восстановления, как правило, крайне медленны, в результате чего происходят необратимые изменения окружающей среды. Для устойчивого развития северных регионов крайне важна всесторонняя оценка биоразнообразия и антропогенной динамики экосистем Арктики и разра-

Участники конференции отметили, что начиная со второй половины XX столетия специалисты научно-исследовательских учреждений, ВУЗов, сотрудники заповедников активно проводили изучение структуры, функций и динамики растительного покрова Крайнего Севера, выявление биоразнообразия и продуктивности тундровых экосистем. Однако в последние годы из-за дефицита бюджетных средств, выделяемых на научные исследования, в том числе на высоко затратные экспедиции, очевидна тенденция сокращения объемов исследований в труднодоступных районах Заполярья. Ощущается недостаток квалифицированных геоботаников-тундроведов и специалистов, изучающих альгофлору, бриофлору и лишенобиоту, фауну и почвы Арктики. При том что сведения о ценотическом и видовом разнообразии растительного и животного мира и почвенного покрова для многих регионов тундровой зоны скудны или отсутствуют, информация об экосистемах Крайнего Севера, имеющаяся в индивидуальных базах данных исследователей, а также различных научных учреждений и ВУЗов, разрознена, опубликована не в полной мере, поэтому не вовлечена в научный процесс. До сих пор немногочисленные изданные в открытой печати работы, в которых приведены таблицы геоботанических опи-



Н.В.Матвеева (БИН РАН, Санкт-Петербург) – д.б.н., ведущий специалист-геоботаник по полярным и тундровым регионам.

ботка научно обоснованных рекомендаций по их рациональному восстановлению. Для этого необходимо районирование территории по устойчивости ландшафтов и выявление наиболее уязвимых природных комплексов, в которых целесообразно проведение специальных мероприятий по их восстановлению.

Анализ существующих на территории Российской Арктики объектов природно-заповедного фонда свидетельствует о том, что в настоящее время вне сферы охраны остаются не только многие наиболее типичные (эталонные) для тундровой зоны, но и уникальные ландшафты и экосистемы с местообитаниями редких видов. Необходимо усилить формирование единого экологического каркаса из особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и не допускать выведение уже учрежденных ООПТ из состава природно-заповедного фонда и сокращения их площадей.

При обсуждении резолюции на закрытии конференции участники отметили важность поддержки приоритетных комплексных исследований и инвентаризации экосистем Крайнего Севера, а также воссоздание сети стационаров для мониторинга экосистем Крайнего Севера. Продолжение работ по формированию экологического каркаса ООПТ, создаваемых для сохранения эталонных и редких экосистем, местообитаний редких видов. Было решено поддержать инициативу WWF о создании заповедника «Енганеп» на Полярном Урале и государственного природного заказника «Колгуевский» на о-ве Колгуев. Особое внимание уделено развитию экологического образования, включая программы поддержки школьных научно-исследовательских работ путем формирования системы партнерского взаимодействия «образование – социум – наука». С целью усиления экологической информированности населения наиболее актуально выделение зон рекреации и экологических троп в пределах существующих на Крайнем Севере ООПТ.

Обсуждалась необходимость широкого внедрения количественных методов исследования, ГИС-технологии, дистанционных методов, особенно с использованием космических снимков высокого разрешения. Перед исследователями Арктики остро стоят следующие задачи: публикация списков видов локальных флор и фаун, оригинальных геоботанических материалов и сведений о составе и структуре животного населения; усиление работы по унификации экологической и ценотической терминологии, разработке типологии экотопов; практические шаги по созданию общедоступных баз данных по флоре, фауне и растительности; формирование электронных перечней опорных пунктов мониторинга экосистем Крайнего Севера, включающий информацию о биоразнообразии различных районов, созданию и поддержанию сайта с библиографическим списком научных трудов о биологическом разнообразии Российской Арктики. Важно усилить работу по поддержанию, расширению и современному оснащению коллекционных фондов, являющихся основой для изучения биоразнообразия.

Для координации исследований и обмена полученными результатами важно возобновить практику регулярного проведения междисциплинарных всероссийских и международных научных конференций для обсуждения проблем изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Крайнего Севера, а также регулярно проводить научные школы для молодых ученых, семинары по конкретным актуальным проблемам и создать действенную систему повышения квалификации научных кадров.

Принято решение вторую конференцию «Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана» провести в 2016 г.

Участники конференции выразили благодарность администрации Института биологии Коми НЦ УрО РАН и оргкомитету за высокий уровень организации и проведения научного мероприятия.

Председатель программного Комитета
Директор Института биологии
Коми НЦ УрО РАН

д.б.н. С.В. Дёгтева

Председатель Оргкомитета
зав. лабораторией геоботаники
и сравнительной флористики

к.б.н. Е.Н. Патова



Фото акад. М.П. Роневского

НАДЕЖДА АПОЛЛОНОВНА ЧЕРМНЫХ

12 июля 2013 г. отметила свой 75-летний юбилей и 50-летие научного стажа известный ученый физиолог, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сравнительной кардиологии Коми НЦ УрО РАН, заслуженный работник Республики Ко-

ми **Надежда Аполлоновна Чермных.**

Н.А. Чермных внесла существенный вклад в познание физиологических механизмов адаптации организма к среде обитания, что составляет основу жизни. С ее именем связаны исследования в различных областях науки – физиологии продуктивных животных, экологической физиологии животных Севера (северный олень, лось), социальной физиологии человека, исторической этнодемографии как критерия оценки здоровья коренного населения Республики Коми, геронтофизиологии сердечно-сосудистой системы человека. В каждом из направлений своей работы она использовала творческие неординарные подходы и методические приемы исследований, на основании которых получены новые оригинальные результаты и выявлены физиологические закономерности адаптации человека и животных, имеющие большое теоретическое и практическое значение.

В лаборатории экологической физиологии животных под руководством Н.А. Чермных были проведены многолетние полевые исследования терморегуляции, энергообмена, дыхания и сердечной деятельности северных оленей и лосей с использованием дистанционной регистрации физиологических параметров при изучении функционирования гомеостатических систем организма в условиях Севера. Это позволило получить уникальные данные, раскрывающие специфику природных адаптаций диких животных. Наибольший научный интерес представляют исследования Н.А. Чермных физиологии северных оленей в их естественной среде обитания тундровых экосистем. В структуре терморегуляторных реакций оленей на воздействие охлаждающих факторов среды впервые выявлен феномен минимизации энергетического метаболизма при включении «жесткого» контроля сокращения теплоотдачи с дыханием и повышения эффективности теплоизоляции с поверхности тела. Эволюционно сформировавшиеся у животных-аборигенов Севера механизмы экономии тепло-содержания, обеспеченные морфо-функциональ-

ными особенностями дыхательных путей оленей, являются звеном единой системы поддержания жизненно необходимого для организма температурного гомеостаза в экстремальных условиях теплового и энергетического дефицита среды. Полученные материалы опубликованы в статьях и в монографии «Экологическая физиология северного оленя» (Чермных, 2008).

В лаборатории социальной физиологии и здоровья на основании архивных материалов Печорского края проведен детальный ретроспективный анализ 200-летнего периода развития локальной группы северных коми, результаты которого представлены в монографии «Этнодемографическая оценка здоровья ижемских коми в XVIII – XX веках» (Чермных, 2002). Впервые раскрыты адаптивные возможности человека, высокий потенциал физического, духовного и социального здоровья этноса при освоении одной из суровых природных зон на планете. Жизнеспособность и успешное воспроизводство населения характеризуются и высоким уровнем долголетия, что определено генофондом прошлых поколений в группе ижемских коми. На основании геронтофизиологических исследований сердца северных долгожителей Н.А. Чермных обнаружен феномен устойчивости структуры сердечного ритма и функционального гомеостаза сердечной деятельности. Показана значительная роль влияния социальных условий на состояние здоровья и сохранение в пожилом возрасте стабильности работы сердечно-сосудистой системы – определяющего фактора продолжительности жизни человека и прогноза его активного долголетия.

Надежда Аполлоновна – очень ответственный человек, занимающий оптимистическую жизненную позицию. Она принимала активное участие при создании Института физиологии Коми НЦ УрО РАН, являясь его первым ученым секретарем. К научно-организационной деятельности Н.А. Чермных следует отнести подготовку и проведение в Сыктывкаре в должности ответственного секретаря Оргкомитетов двух крупных научных мероприятий: VI Всесоюзной конференции по экологической физиологии и Третьего Международного симпозиума по лосю. В течение 10 лет она была ученым секретарем Диссертационного совета Института физиологии Коми НЦ УрО РАН. Имея огромный опыт исследователя, Надежда Аполлоновна всегда готова помочь советом и поддержать молодых ученых. Она являлась научным руководителем работ студентов, соискателей и пяти аспирантов, четверо из которых успешно защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Н.А. Чермных – автор и соавтор более 160 научных работ, из них трех монографий, а также состави-

тель «Библиографического указателя работ по физиологии человека и животных сотрудников Коми филиала АН СССР и Института физиологии УрО РАН (1954-2003 гг.)». Она неоднократно выступала с докладами на международных, всесоюзных и республиканских научных совещаниях.

Большой вклад научной и научно-организационной деятельности Н.А. Чермных в развитие северной экофизиологии отмечен почетными грамотами Президиума АН СССР, Совета Мини-

стров Коми АССР, Верховного Совета Республики Коми; званием «Заслуженный работник Республики Коми» (1998); медалями «Ветеран труда» и орденом «За заслуги перед Отечеством II степени» (2003), знаком отличия Республики Коми «За безупречную службу Республике Коми» (2013).

Поздравляем Надежду Аполлоновну с юбилеем, желаем крепкого здоровья, счастья и творческого долголетия.

редколлегия

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ журнала «Известия Коми НЦ УрО РАН»*

Журнал публикует научно-аналитические обзоры (объем до 25 м.с.), оригинальные статьи (до 15 м.с.) и краткие сообщения (до 6 м.с.) теоретического и экспериментального характера по проблемам естественных, технических, общественных и гуманитарных наук, в том числе региональной направленности. К публикации также принимаются комментарии к ранее опубликованным работам, информация о научных конференциях, рецензии на книги, хроника событий научной жизни. Статьи должны отражать результаты законченных и методически правильно выполненных работ.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала после рецензирования, учитывая новизну, научную значимость и актуальность представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не рассматриваются.

Общие требования к оформлению рукописей

Статьи должны сопровождаться направлением научного учреждения, где была выполнена работа. В необходимых случаях должно быть приложено экспертное заключение. Организация, направляющая статью, как и автор(ы), несет ответственность за её научное содержание, достоверность и оригинальность приводимых данных. Изложение материала статьи должно быть ясным, лаконичным и последовательным. Статья должна быть хорошо отредактирована, тщательно проверена и подписана всеми авторами (автором) с указанием (полностью) фамилии, имени, отчества, домашнего адреса, места работы, служебного и сотового телефонов и e-mail.

В редакцию подается рукопись статьи в двух экземплярах – на бумаге и на диске в редакторе WinWord под Windows. Математические статьи могут подаваться в редакторе TEX. Электронная и бумажная версии статьи должны быть идентичны. Электронный вариант рукописи может быть прислан по электронной почте на адрес редакционной коллегии: journal@presidium.komisc.ru. Текст должен быть набран на компьютере (шрифт Times New Roman, кегль 14) в одну колонку через 1,5 интервала на бумаге форматом А4. По всей статье шрифт должен быть одинаковым. Поля страниц оригинала должны быть не менее: левое – 25 мм, верхнее – 20 мм, правое – 10 мм, нижнее – 25 мм. Объем иллюстраций (таблицы, рисунки, фото) в статье не должен превышать 8-10, а список литературы – 15 наименований. Количество иллюстраций в кратких сообщениях не должно превышать, соответственно, 5.

Первая страница рукописи оформляется следующим образом: в начале статьи указывается индекс Универсальной десятичной классификации (УДК); затем прописными буквами печатается название статьи, которое должно быть максимально кратким (информированным) и не содержать сокращений; далее следуют инициалы и фамилии авторов. Отдельной строкой дается название учреждения и города (для иностранных авторов – также страны). Ниже печатается электронный адрес для переписки. При наличии авторов из нескольких организаций необходимо арабскими цифрами указать их принадлежность. Через один полуторный интервал следует краткая аннотация (8-10 строк), в которой сжато и ясно описываются основные результаты работы. После аннотации через полуторный интервал приводятся ключевые слова (не более 6-8). Далее идут название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке.

Текст статьи состоит, как правило, из введения, основного текста, заключения (резюме) и списка литературы. В статье, описывающей результаты экспериментальных исследований, рекомендуется выделить разделы: «Материал и методы», «Результаты и обсуждение». Отдельно прилагаются подрисовочные подписи.

Во введении (заголовком не выделяется) в максимально лаконичной форме должны быть изложены цель, существо и новизна рассматриваемой задачи с обязательным кратким анализом данных наиболее важных и близких по смыслу работ других авторов. Однако введение не должно быть обзором литературы. В разделе «Материал и методы» должны быть четко и кратко описаны методы и объекты исследования. Единицы измерения следует приводить в Международной системе СИ. Подробно описываются только оригинальные методы исследования, в других случаях указывают только суть метода и дают обязательно ссылку на источник заимствования, а в случае модификации – указывают, в чем конкретно она заключается.

При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в аннотации), необходимо давать их полное наименование, и сокращение в скобках, в последующем применяя только сокращение. Сокращение проводить по ключевым буквам слов в русском написании. Все используемые, включая общепринятые, аббревиатуры должны быть расшифрованы при первом упоминании. Все названия видов флоры и фауны при первом упоминании в тексте обязательно даются на латыни с указанием авторов.

В разделе «Результаты и обсуждение» полученные данные приводят либо в табличной форме, либо на рисунках, без дублирования одной формы другой, и краткого описания результатов с обсуждением в сопоставлении с данными литературы.

* Включен в перечень ведущих периодических изданий ВАК.

Таблицы должны быть составлены в соответствии с принятым стандартом, без включения в них легко вычисляемых величин. Все результаты измерений должны быть обработаны и оценены с применением методов вариационной статистики. Таблицы нумеруются по мере упоминания в статье, каждой дается тематический заголовок, и размещаются на отдельной странице. Таблицы призваны иллюстрировать текстовый материал, поэтому описывать их содержание в тексте не следует. Ширина таблицы должна быть либо 90 мм (на одну колонку), либо 185 мм (на две колонки). Текст в таблице набирается шрифтом Times New Roman, кегль 9-10, через два интервала. Сокращение слов в шапке таблиц не допускается. Пустые графы в таблицах не допускаются. Они должны быть заменены условными знаками, которые объясняются в примечании. Единицы измерения даются через запятую, а не в скобках: масса, г. Если таблица в статье одна, то ее порядковый номер не ставится и слово «Таблица» не пишется.

Рисунки представляются пригодными для непосредственного воспроизведения, пояснения к ним выносятся в подрисуночные подписи (за исключением кратких цифровых или буквенных обозначений), отдельные фрагменты обозначаются арабскими цифрами или буквами русского алфавита, которые расшифровываются в подрисуночных подписях. На рисунках, выполненных на компьютере, линии должны быть яркими (4-5 pix).

Ширина рисунков должна быть либо 90 мм, либо 185 мм, а высота – не более 240 мм. Шрифт буквенных и цифровых обозначений на рисунках – Times New Roman, кегль –9-10. На рисунках следует использовать разные типы штриховок с размером шага, допускающим уменьшение, а не оттенки заливки серого и черного цветов. Каждый рисунок должен быть выполнен на отдельной странице. На обратной стороне рисунка простым карандашом или ручкой указывается фамилия первого автора статьи и номер рисунка.

Карты должны быть выполнены на географической основе ГУГК (контурные или бланковые карты). Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания.

Фотографии представляют нескрепленными на белой глянцева бумаге в двух экземплярах (один из них чистый, без каких-либо надписей) в конверте. Желательно обрезать их до необходимого размера репродукции, чтобы они попадали в размеры страницы. На обратной стороне (на полях) фотографий простым карандашом указываются фамилии первого автора, название статьи, порядковый номер рисунка, его верх или низ. Подрисуночные подписи оформляются на отдельной странице. В подписях к микрофотографиям указываются увеличение объектива и окуляра, метод окраски.

Местоположение каждой таблицы, рисунка, карты, фотографии при первом упоминании их в тексте отмечается на полях рукописи в квадратных рамках простым карандашом.

Математические и химические обозначения и формулы печатаются или вписываются с соблюдением размеров прописных и строчных букв. Во избежание неясности прописные и строчные буквы, имеющие одинаковое начертание (с, k, j, p, u, v, w, x, y, ψ), следует подчеркнуть двумя черточками: прописные – снизу (S), а строчные – сверху (p). Необходимо тщательно вписывать такие буквы, как j («йот») и l («эль»). Греческие буквы обводятся кружком красного цвета. Знак суммы (Σ) красным не обводится. Название неясных букв желательно написать карандашом на полях (например, «эль», «кси», «дзета», «не эль», «и», «йот»).

Математические символы, которые набираются прямым, а не курсивным шрифтом, типа log, lim, max, min, sin, tg, Ri, Im, числа Рея (Re), Россби (Ro), Кибеля (Ki) и другие, а также химические символы, отмечаются снизу квадратной скобкой. Необходимо также дать расшифровку всех используемых в статье параметров, включая подстрочные и надстрочные индексы, а также всех аббревиатур (условные сокращения слов). Следует соблюдать единообразие терминов. Нумерация формул (только тех, на которые есть ссылка в тексте) дается в круглых скобках с правой стороны арабскими цифрами.

В тексте цитированную литературу приводить только цифрами в квадратных скобках. Список литературы должен быть представлен на отдельной странице и составлен в порядке упоминания источников в тексте в соответствии со следующими правилами описания. Журнальные публикации: фамилии и инициалы всех авторов, полное название статьи журнала, название журнала (в соответствии с рекомендованным ВИНТИ списком сокращений), год, том, выпуск (номер), страницы (первая и последняя). Книги: фамилии и инициалы всех авторов, полное название книги, инициалы и фамилии редакторов, город, год, страницы (если ссылка не на всю книгу) или число страниц в книге. Сборники: фамилия и инициалы авторов, полные названия статьи и сборника, первая и последние страницы. Если сборник содержит материалы конференций, необходимо указать их форму (труды, доклады, материалы) и название конференции. Диссертации: фамилия и инициалы автора, полное название диссертации, на соискание какой степени, в каких науках, город, институт, в котором выполнена работа, год. Ссылки на авторефераты допускаются в исключительных случаях с указанием фамилии и инициалов автора, полного названия работы, места и года защиты, общего количества страниц. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список литературы оформляется по нижеприведенным примерам (следует обратить особое внимание на знаки препинания):

1. Иванов И.И. Название статьи // Название журнала. 2005. Т.41. № 4. С. 18-26.

2. *Петров П.П.* Название книги. М.: Наука, 2007. Общее число страниц в книге (например, 180 с.) или конкретная страница (например, С. 75.).

3. *Казаков К.К.* Название диссертации: Дис. «...». канд. биол. наук. М.: Название института, 2002. 164 с.

4. *Мартынюк З. П.* Патент RU № 92963 на полезную модель "Фотограмметрическое средство измерений объемов круглых лесоматериалов при проведении погрузо-разгрузочных работ". Патенто-обладатель(и): Учреждение Российской академии наук Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН.

При наличии четырех авторов в списке литературы указываются все, а более четырех – только первые три, а далее пишется «и др.».

Для статей журналов, имеющих русскую и английскую версию, необходимо давать в списке литературы двойную ссылку (под одним номером), например:

1. *Иванов И.И., Петров П.П.* Название статьи // Название журнала. 2008. Т. 47. № 1. (8-18). *Ivanov I., Petrov P.* Article name // Magazine name. 2008. Т. 47. № 1. (4-15).

При несоблюдении этих перечисленных правил статья не рассматривается редакционной коллегией, а возвращается авторам на доработку.

Все статьи проходят рецензирование и в случае необходимости возвращаются авторам на доработку. Рецензирование статьи закрытое. Возможно повторное и параллельное рецензирование. Редакционная коллегия оставляет за собой право редактирования статьи. Статьи публикуются в порядке очередности, но при этом учитывается их тематика и актуальность. Редакционная коллегия сохраняет первоначальную дату поступления статьи, а, следовательно, и очередность публикации, при условии возвращения ее в редакционную коллегия не позднее, чем через 1 месяц. Корректуру принятой в печать статьи редакционная коллегия иногородним авторам рассылает по e-mail. Автор в течение 7-10 дней должен вернуть ее в редакционную коллегия или передать правку по указанному телефону или электронному адресу (e-mail) редакционной коллегии. В случае отклонения материала рукописи, приложения и дискета не возвращаются.

Требования к электронной версии статьи

При подготовке материалов для журнала с использованием компьютера рекомендуются следующие программы и форматы файлов.

Текстовые редакторы: Microsoft Word for Windows. Текст статьи набирается с соблюдением следующих правил:

- набирать текст без принудительных переносов;
- разрядки слов не допускаются;
- уравнения, схемы, таблицы, рисунки и ссылки на литературу нумеруются **в порядке их упоминания в тексте**; нумеровать следует лишь те формулы и уравнения, на которые даются ссылки в тексте;

- в числовых значениях **десятичные разряды отделяются запятой**;

- вставка символов **Symbol**.

Графические материалы: *Растровые рисунки* должны сохраняться только в формате TIFF с разрешением 300 dpi (точек на дюйм) для фотографий и не менее 600 dpi (точек на дюйм) для остальных рисунков (черно-белый). Использование других форматов нежелательно.

Векторные рисунки (не диаграммы) должны предоставляться в формате программы, в которой они созданы: CorelDraw, Adobe Illustrator. Если использованная программа не является распространенной, необходимо сохранить файлы рисунков в формате Enhanced Windows Metafile (EMF) или Windows Metafile (WMF).

Диаграммы: Рекомендуется использовать Microsoft Excel, Origin для Windows (до версии 6.0).

Не рекомендуется пользоваться при работе программой Microsoft Graph и программами Paint из Windows 95, Microsoft Draw.

Рукописи статей **только простым письмом** направлять по адресу:

Ответственному секретарю редакционной коллегии

журнала «Известия Коми НЦ УрО РАН»

Надежде Валериановне Ладановой

167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24,

Президиум Коми НЦ УрО РАН, каб. 209

Тел. (8212) 24-47-79; тел, факс (8212) 24-17-46

E-mail: journal@presidium.komisc.ru.

www.izvestia.komisc.ru

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ
Коми научного центра
Уральского отделения РАН

Вып. 3(15)

Редактор Т.В.Цветкова
Компьютерный дизайн и стилистика Р.А.Микушев
Компьютерное макетирование Н.А.Сулейманова

Лицензия № 0047 от 10.01.1999.
Компьютерный набор. Подписано в печать 07.10.2013.
Формат бумаги 60x84¹/₈. Печать офсетная.
Усл.-печ.л. 16,5. Уч.-изд.л. 16,25. Тираж 300. Заказ № 36.

Редакционно-издательский отдел
Коми научного центра УрО РАН.
167982, ГСП, г.Сыктывкар, ул.Первомайская, 48.