

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 1, 2017

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Кирыанова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2017

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on-line) – 2413-1830

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339
(без самоцитирования – 0,287)

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

**BULLETIN
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 328, № 1, 2017

**BULLETIN
OF THE TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY.
GEO ASSETS ENGINEERING**

Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Rikhvanov L.P., Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korobochkin V.V., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2017

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- К вопросу об оптимизации формы геологических выработок и топологии их укрепления**
Павлов С.П., Крысько В.А., Бодягина К.С. **6**
- Комплексная оценка палеоклиматических факторов реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктических районов Западной Сибири**
Исаев В.И., Искоркина А.А., Косыгин В.Ю., Лобова Г.А., Осипова Е.Н., Фомин А.Н. **13**
- Естественный миграционный потенциал благородных металлов Монголо-Охотского золотоносного пояса**
Радомский С.М. **29**
- Основной солевой состав и редкоземельные элементы как индикаторы экологического состояния рек Южного Приморья**
Вах Е.А., Павлова Г.Ю., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. **39**
- Термальные подземные воды Восточно-Предкавказского артезианского бассейна: экономические аспекты использования на примере Ханкальского месторождения**
Фархутдинов А.М., Хамитов И.Ш., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Заурбеков Ш.Ш., Шаипов А.А., Лабазанов М.М. **50**
- Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг.**
Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г. **62**
- Петрографические и минералогические особенности ультрамафитов Кирельского фрагмента Канского зеленокаменного пояса (СЗ Восточного Саяна)**
Чернышов А.И., Бабинцев Н.А., Ворошилов В.Г. **75**
- Вопросы линеаризации математической модели преобразователя напряжения, применяемого в системах электропитания, работающих на основе возобновляемых источников энергии**
Диксон Р.К., Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г., Русскин В.А., Семёнов С.М. **89**
- Применение эмпирической модовой декомпозиции при обработке геофизических данных**
Долгаль А.С., Христенко Л.А. **100**
- Литолого-фациальные особенности строения верхнеюрских отложений месторождения Т**
Бегма Д.С., Белкина В.А. **108**
- Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти**
Боловин Е.В., Глазырин А.С. **123**
- On the issue of optimizing the shape of geological excavations and topology of their strengthening**
Pavlov S.P., Krysko V.A., Bodyagina X.S. **6**
- Integrated assessment of paleoclimate factors of reconstructing thermal history of petromaternal Bazhenov suite in arctic regions of Western Siberia**
Isaev V.I., Iskorkina A.A., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Osipova E.N., Fomin A.N. **13**
- Natural migration potential of noble metals of Mongol-Okhotsk gold belt**
Radomskiy S.M. **29**
- Basic salt composition and rare earth elements as indicators of ecological state of the rivers of southern Primorye**
Vakh E.A., Pavlova G.Yu., Mikhaylik T.A., Tishchenko P.Ya., Semkin P.Yu. **39**
- Geothermal waters of East-Ciscaucasian artesian basin: economical aspects of using by the example of Khankala deposit**
Farkhutdinov A.M., Khamitov I.Sh., Cherkasov S.V., MintsaeV M.Sh., Zaurbekov Sh.Sh., Shaipov A.A., Labazanov M.M. **50**
- Climate of West Siberia during the slowing phase of warming (1986–2015) and prediction of hydro-climatic resources for 2021–2030**
Paromov V.V., Zemtsov V.A., Kopysov S.G. **62**
- Petrografical and mineralogical features of ultramafites from Kirelsk fragment of Kans greenstone belt (NW of the East Sayan)**
Chernyshov A.I., Babintsev N.A., Voroshilov V.G. **75**
- Issues of linearization of a two-phase boost DC-DC converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources**
Dixon R.C., Mikhachenko G.Ya., Mikhachenko S.G., Russkin V.A., Semenov S.M. **89**
- Application of empirical mode decomposition method in processing geophysical data**
Dolgal A.S., Khristenko L.A. **100**
- Litological and facies characteristics of upper Jurassic sediments of the T field**
Bagma D.S., Belkina V.A. **108**
- Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production**
Bolovin E.V., Glazyrin A.S. **123**

УДК 539.37

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ВЫРАБОТОК И ТОПОЛОГИИ ИХ УКРЕПЛЕНИЯ

Павлов Сергей Петрович¹,
pspsar@yandex.ru

Крысько Вадим Анатольевич¹,
tak@san.ru

Бодягина Ксения Сергеевна¹,
bodksen@mail.ru

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

Актуальность. При проведении горных работ и образовании горных выработок, происходит изменение естественного напряженно-деформированного состояния окружающего выработку массива. В результате изменяется деформированное и напряженное состояние массивов породы в окрестности выработки, что может привести к ее обрушению. Эти напряжения существенно зависят от формы поперечного сечения выработки и вида дополнительных укреплений свода штольни. Таким образом, возможность предсказывать эти процессы, а тем более управлять ими, создавая оптимальные формы и виды укрепления сводов, может снизить вероятность разрушения штольни и повысить их надежность.

Цель работы: моделирование и оптимизация формы выработок в виде длинных тоннелей, которые можно считать находящимися в условиях плоского деформированного состояния; проектирование оптимальной топологии несущей конструкции вокруг выработки для оптимальных форм сводов, воспринимающей основные нагрузки как от собственного веса, так и от веса вышележащей породы.

Методы. Для математического моделирования поведения выработки используются методы конечных и граничных элементов для задач механики твердого деформируемого тела и методы оптимизации формы упругих тел, разработанные авторами. Для задач укрепления свода штолен применяется метод топологической оптимизации.

Результаты. Созданы алгоритмы и программы оптимизации формы и топологической оптимизации для плоской задачи теории упругости. На примере модельной задачи показаны возможности оптимизации формы свода выработки и ее оптимального внешнего укрепления стальной конструкцией с целью снижения максимального касательного напряжения (критерий Треска), что позволило снизить эти напряжения на порядок.

Ключевые слова:

Оптимизация формы упругого тела, топологическая оптимизация, критерий Треска, методы конечных и граничных элементов, оптимальная форма сводов тоннелей.

Введение

При проектировании формы поперечного сечения тоннелей, сводов штолен и выработок в массиве породы возникают задачи определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности их границы с целью устранения причин их разрушения. В большинстве задач такого рода для протяженных выработок применяется модель плоского деформируемого состояния механики твердого деформируемого тела [1–3].

Обычно прочность ненарушенной скальной породы значительно превышает прочность установленной крепи в выработке. Поэтому при проходке выработок необходимо, прежде всего, стремиться к сохранению первоначального состояния горной породы и к укреплению слабых участков окружающего массива, чтобы не допустить чрезмерных деформаций, разуплотнения и потери несущей способности примыкающей к выработке несущей части породы. Кроме того, для повышения устойчивости сооружения необходимо так укрепить окружающую породу, чтобы она сама смогла выполнять роль строительного материала и основной

несущей конструкции, т. е. создать несущий породный свод, воспринимающий основные нагрузки как от собственного веса, так и от веса вышележащей породы. В этом случае внутренняя облицовка имеет второстепенное значение, лишь повышая устойчивость породного свода. Вопросы и технологии укрепления породного слоя рассмотрены в работах [2, 4–6].

При моделировании НДС в задачах геомеханики в последнее время широко применяются численные методы, такие как метод конечных элементов [7] и метод граничных элементов [8].

Наибольшее влияние на величину концентрации напряжений оказывает форма поперечного сечения свода выработки [2]. Задачи оптимизации формы рассмотрены в [9], где выведены необходимые условия оптимальности для задач оптимизации формы для функционалов произвольного вида. В [10, 11] рассматривается математическое моделирование и оптимизация формы в задачах термоупругости для плоского деформированного состояния. Эти результаты могут быть использованы для оптимизации формы выработок по критерию

минимума максимального касательного напряжения на несущем породном слое.

Вторым способом повышения устойчивости выработок к разрушению, как уже было сказано выше, является создание вокруг них некоторой несущей конструкции с целью снижения концентрации напряжений на границе полости. Подобная задача может быть решена методами топологической оптимизации [12]. Топологическая оптимизация позволяет перераспределить усиливающий материал по массиву породы оптимальным по заданному критерию способом при заданном количестве этого материала. Этот метод получил свое развитие в последние годы [13–18] и широко применяется для проектирования армирующих элементов в упругих структурах.

Целью работы является моделирование напряженно-деформированного состояния выработок в виде длинных тоннелей с поперечным сечением различной формы, которые можно считать находящимися в условиях плоского деформированного состояния, оптимизация формы свода выработки и получение оптимальной несущей конструкции вокруг выработки, воспринимающей основные нагрузки как от собственного веса, так и от веса вышележащей породы.

Постановка задачи

Геомеханические процессы, связанные с сооружением выработок в горном массиве, проявляются только в некоторой ограниченной окрестности области массива, содержащей выработку. Поэтому при постановке задачи рассматривается не весь массив, а некоторая ограниченная область, границы которой выбираются таким образом, чтобы исследуемые механические напряжения в этой области мало отличались от напряжений в бесконечном массиве.

Расчетную схему представим в виде горизонтального туннеля бесконечной длины, в ограниченной области тяжелого массива породы в окрестности туннеля, то есть нагруженного гравитационными силами, которые обозначены вертикальными стрелками. Внешняя граница массива Γ_1 свободна от нагрузки. Внутренняя граница туннеля Γ_3 также свободна от нагрузок. Нижняя граница Γ_2 массива закреплена к грунту.

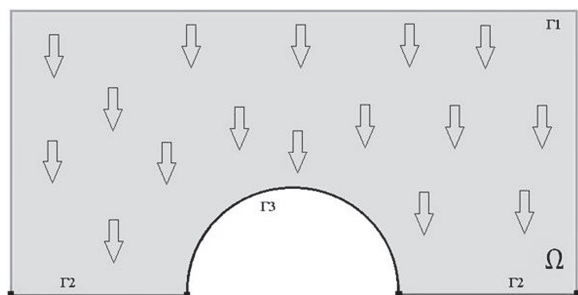


Рис. 1. Исходная форма туннеля и расчетная схема

Fig. 1. Original form of a tunnel and design scheme

Оптимизация формы. Требуется минимизировать величину максимального касательного напряжения

$$\tau = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2}{2} + 2\sigma_{12}^2}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – напряжения в области Ω , за счет изменения формы полости при условии, что площадь поперечного сечения конструкции не превосходит заданной величины. За исходную выбрана конструкция, показанная на рис. 1.

Так как положение точки, в которой достигается максимум функции $\tau(\mathbf{x}, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22})$, неизвестно, то задача сводится к минимизации функционала:

$$J_c = \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \tau(\mathbf{x}, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}) = \|\tau\|_c. \quad (2)$$

Для локальных функционалов такого типа разработаны приближенные методы редукции к задачам с интегральными функционалами. Один из них [19] основан на близости нормы в пространстве непрерывных функций $\|\tau\|_c$ норме на пространстве L^q функций, интегрируемых с q -й степенью при достаточно больших значениях q . Учитывая это, можно приближенно заменить (2) функционалом

$$J_q = \left(\frac{1}{m(\Omega)} \int_{\Omega} |\tau|^q d\Omega \right)^{1/q}, \quad (3)$$

где $m(\Omega)$ – мера множества Ω . Там же дана оценка точности такого приближения.

Без потери общности функционал цели (2), с учетом (3), может быть взят в виде

$$J = \int_{\Omega} \tau_{\max}^{2q} d\Omega, \quad (4)$$

где q – заданное достаточно большое число. Изопараметрическое ограничение имеет вид

$$\int_{\Omega} d\Omega - A \leq 0, \quad (5)$$

где A – площадь поперечного сечения исходной конструкции.

Конструкция находится в плоском деформированном состоянии, и функции отклика должны удовлетворять соотношениям Коши, уравнениям состояния и равновесия

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (6)$$

$$\sigma_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2}(\varepsilon_{11} + \nu_1 \varepsilon_{22}), \quad \sigma_{22} = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2}(\varepsilon_{22} + \nu_1 \varepsilon_{11}),$$

$$\sigma_{12} = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} \varepsilon_{12}, \quad (7)$$

где

$$E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad \nu_1 = \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad (8)$$

а также соответствующим граничным условиям. Задача (6)–(8) решается методом граничных элементов, что позволяет с большей точностью вычи-

слать значения напряжений на границе свода выработки Γ_3 .

Общее выражение для анализа чувствительности функционала цели и ограничений, основанное на слабой формулировке задачи термоупругости и позволяющее учитывать одновременное изменение в процессе оптимизации как температурных, так и деформационных полей, получено в [9]. Оно позволяет получать значения производных для функционалов общего вида в более широких функциональных пространствах, когда все решения краевых задач удовлетворяют лишь вариационным уравнениям или неравенствам.

Для поставленной выше задачи выражение для производной функционала (4) и ограничения (5) по параметру трансформирования области приведено в [10]. Там же получено условие оптимальности формы выработки в виде

$$\left(\frac{\sigma_{\tau\tau}^2}{2}\right)^q + \sigma_{\tau\tau} \varepsilon_{\tau\tau}^* = \text{const.}$$

Здесь $\sigma_{\tau\tau}$ – касательные напряжения на границе выработки; $\varepsilon_{\tau\tau}^*$ – сопряженные касательные деформации, которые получаются после решения соответствующей плоской задачи теории упругости [10] методом граничных элементов.

Топологическая оптимизация элементов укрепления свода. Требуется минимизировать величину максимального касательного напряжения (1) на границе выработки посредством распределения дополнительных укрепляющих элементов в грунте, окружающем выработку.

Оптимизация топологии несущей конструкции вокруг выработки заключается в поиске наилучшего распределения усиливающего материала для достижения максимального снижения напряжений на границе выработки. В методе топологической оптимизации, изложенном в работе [12], модуль Юнга является функцией плотности материала, тензор напряжений считается функцией от модуля Юнга E_0 армирующего материала и искусственно введенной плотности $\rho(x)$, которая выступает в качестве переменной управления в задаче оптимизации:

$$E(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x})^p E_0, \quad \mathbf{x} \in \Omega.$$

Показатель степени $p \geq 1$ является фактором штрафа, и увеличение p приводит к более четкому решению. При $\rho(x)=1$ вся область полностью заполнена армирующим материалом. Таким образом, необходимо найти

$$\min_{\rho(x)} \int_{\Gamma_3} \tau_{\max}^{2q} ds, \quad (9)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) d\Omega \leq \gamma A, \\ 0 &< \delta \leq \rho(\mathbf{x}) \leq 1, \end{aligned} \quad (10)$$

где γ – процент экономии армирующего материала.

Для получения численного решения в каждой точке массива плотность не должна исчезать полностью, поэтому в последнем неравенстве положим $\delta=10^{-5}$. Это позволит избежать сингулярности начальной матрицы жесткости при решении задачи оптимизации.

Для решения задачи оптимизации (9), (10), при вычислениях с помощью градиентных методов, основной задачей является анализ чувствительности, вычисление производных по проектным переменным. Предположим, что рассматриваемая область массива разбита на конечные элементы и каждому элементу присваивается переменная плотность ρ_i ($i=1, n$). При этом элементы матрицы жесткости связаны с переменной плотностью степенным законом

$$K_i = \rho_i^p \bar{K}_i,$$

где \bar{K}_i обозначает номинальную матрицу жесткости элемента i для $\rho_i=1$. Показатель степени p является фактором штрафа, который обычно выбирают равным $p=4$ или $p=5$.

Таким образом, глобальная матрица жесткости примет следующий вид

$$K = \sum_{i=1}^n L_i^T K_i L_i = \sum_{i=1}^n L_i^T \rho_i^p \bar{K}_i L_i.$$

Предположим, что вектор внешний нагрузки не зависит от переменной плотности, тогда уравнение системы конечных элементов для рассматриваемой области примет вид

$$KU = F. \quad (11)$$

В топологической оптимизации мы, как правило, работаем с умеренным числом ограничений, поэтому наиболее эффективным способом вычисления производных является использование метода сопряженных переменных [20], где производные для смещений не вычисляются в явном виде. Для минимизации перепишем функционал $J(\mathbf{x})$ из (4), добавив к нему нулевое, в силу (11), слагаемое

$$J(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x}) - \tilde{U}^T (KU - F),$$

где \tilde{U} – произвольный вектор узловых смещений. Исходя из этого, получаем, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \rho_i} &= \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial \rho_i} - \tilde{U}^T \frac{\partial K}{\partial \rho_i} U - \tilde{U}^T K \frac{\partial U}{\partial \rho_i} = \\ &= -\tilde{U}^T \frac{\partial K}{\partial \rho_i} U + \left(\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial U} - \tilde{U}^T K \right) \frac{\partial U}{\partial \rho_i}. \end{aligned}$$

Это равенство, в свою очередь, может быть записано в виде

$$\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \rho_i} = -\tilde{U}^T \frac{\partial K}{\partial \rho_i} U, \quad (12)$$

когда \tilde{U}^T удовлетворяет сопряженному уравнению

$$\tilde{F}^T - \tilde{U}^T K = 0, \quad (13)$$

где $\tilde{F}^T = \partial J(\mathbf{x}) / \partial U$.

Чувствительность функционала (4) к изменению плотности на основании равенств (12), (13) может быть теперь вычислена следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \rho_i} &= -\tilde{F}^T K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \rho_i} U = \\ &= -(\tilde{F}^T K^{-1} L_i^T) p \rho_i^{p-1} \bar{K}_i(L_i U) = \\ &= -(L_i K^{-1} \tilde{F})^T p \rho_i^{p-1} \bar{K}_i(L_i U). \end{aligned}$$

После упрощения приведенное выше выражение можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \rho_i} &= -\tilde{U}_i^T p \frac{K_i}{\rho_i} U_i = \\ &= -\frac{p}{\rho_i} (\tilde{U}_i^T K_i U_i) = -\frac{p}{\rho_i} (\tilde{F}_i^T U_i), \end{aligned} \quad (14)$$

в котором \tilde{F}_i и U_i обозначают сопряженный вектор силы и вектор смещения на конечном элементе i . Производная функционала цели (14) имеет простой вид, легко вычисляется и очень выгодно реализует возможность топологической оптимизации в любой системе конечных элементов.

Численные результаты

При проектировании формы выработки сначала была решена задача оптимизации ее формы (4), (5) методом проекции градиента. Для решения упругой задачи (6)–(8) использовался метод граничных элементов. В результате была получена форма свода выработки, показанная на рис. 2. Безразмерные значения касательных напряжений в этом случае являются постоянными по границе свода и равны 10,81. В качестве конкурирующих форм выработки были рассмотрены еще три неоптимальные в этих условиях нагружения и обычно используемые формы свода: а) полуокруг с площадью поперечного сечения 0,5; б) эллипс с отношением горизонтальной полуоси к вертикальной полуоси 3/2 с той же площадью; в) эллипс с отношением горизонтальной полуоси к вертикальной полуоси 2/3.

Для этих форм максимальные значения касательных напряжений равны: а) 16,57 для полуокруга, б) 18,07 для эллипса, в) 15,64 для эллипса. Таким образом, для свода с оптимальной формой касательные напряжения имеют значения в 1,5 и более раз ниже, чем для остальных форм.

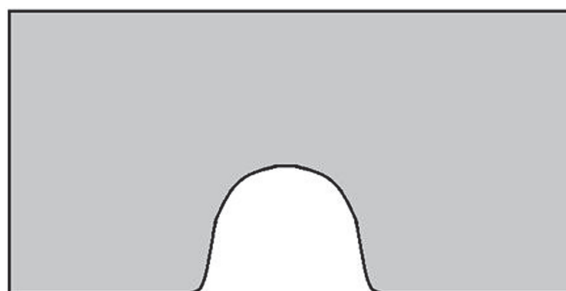


Рис. 2. Оптимальная форма свода выработки

Fig. 2. Optimal shape of excavation arch

Для укрепления окружающей породы и создания дополнительного несущего укрепления свода выработки, воспринимающего основные нагрузки от веса вышележащей породы, используем метод топологической оптимизации (10)–(12) совместно с методом конечных элементов. Площадь армирующей конструкции возьмем равной $\gamma=0,1$, а в качестве армирующего материала выберем сталь. На рис. 3 представлены оптимальные топологии укрепления свода для трех классических форм выработки: а) полуокруга, б) эллипса и в) эллипса соответственно. Здесь темным цветом выделены стальные укрепляющие конструкции, а светлым – естественные породы.

Максимальные значения касательных напряжений после оптимального укрепления для классических форм выработки равны: а) 2,37 для полуокруга, б) 2,83 для эллипса, в) 2,02 для эллипса. То есть еще примерно на порядок ниже, чем без укрепления свода.



Рис. 4. Топология оптимального укрепления для оптимальной формы свода

Fig. 4. Topology of optimal strengthening for optimal arch shape

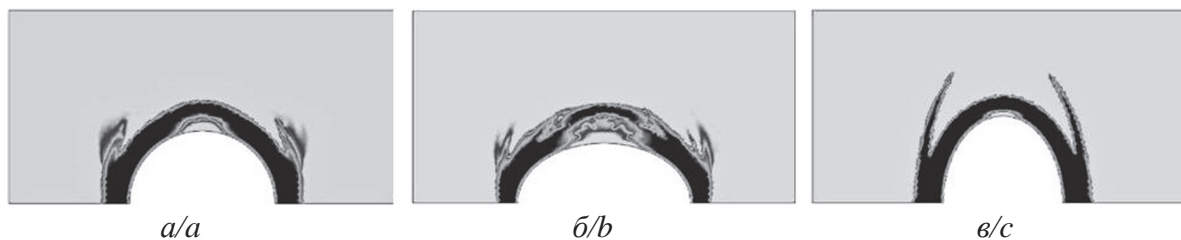


Рис. 3. Оптимальные топологии укрепления свода стальными конструкциями

Fig. 3. Optimal topologies of strengthening arches with steel structures

Оптимальная топология укрепления свода для выработки оптимальной формы, полученной на шаге оптимизации формы, показана на рис. 4. Максимальное значение касательного напряжения после оптимального укрепления для свода этой формы составляет 1,41. То есть еще примерно в 2 раза меньше, чем для классических форм выработок.

Заключение

Использование методов оптимизации при проектировании формы сводов подземных выработок позволяет понизить коэффициент концентрации

напряжений с 44 до 67 % в зависимости от первоначально используемой формы. Дополнительное укрепление массива породы стальной топологически оптимальной конструкцией даже при незначительном количестве используемого для укрепления материала позволяет дополнительно еще снизить концентрацию примерно на порядок. Таким образом, показана возможность оптимального проектирования формы свода выработки и ее оптимального внешнего укрепления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ гранта № 16-11-10138.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклашов И.В. Геомеханика: в 2 т. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. – 208 с.
2. Геомеханика: в 2 т. Т. 2. Геомеханические процессы / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, А.Н. Шашенко, В.Н. Борисов. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. – 249 с.
3. Руководство по проектированию подземных выработок и расчету крепи (К СНиП II -94-80). – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
4. Сыркин П.С., Мартыненко И.А., Данилкин М.С. Шахтное и подземное строительство. Технология строительства горизонтальных и наклонных выработок. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. – 430 с.
5. Каретников В.Н., Клейменов В.Б., Нуждихин А.Г. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок: справочник. – М.: Недра, 1989. – 571 с.
6. СНиП II-94-80. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Подземные горные выработки. – М.: Стройиздат, 1982. – 30 с.
7. Фадеев Б.А. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 235 с.
8. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 236 с.
9. Павлов С.П., Крысько В.А. Оптимизация формы термоупругих тел. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. – 160 с.
10. Павлов С.П., Жигалов М.В. Математическое моделирование и оптимизация формы в одной плоской задаче теории упругости // Вестник СГТУ. – 2011. – № 4 (59). – Вып. 1. – С. 69–75.
11. Павлов, С.П., Жигалов, М.В. Управление внешней границей изолирующего слоя нагретой полости // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 7. – С. 3–12.
12. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology Optimization. Theory, Methods and Applications. – Berlin: Springer, 2003. – 370 p.
13. Topology Optimization Design of Automotive Engine Bracket / Po Wu, Qihua Ma, Yiping Luo, Chao Tao // Energy and Power Engineering. – 2016. – № 8. – P. 230–235.
14. Ji-Hong Zhu, Kai-Ke Yang, Wei-Hong Zhang. Backbone cup – a structure design competition based on topology optimization and 3D printing // Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim. – 2016. – V. 7. – № A1. – P. 1–6.
15. Huang X., Xie Y.M. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 223 p.
16. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches. A comparative review // Structural and Multidisciplinary Optimization. – December 2013. – V. 48. – Iss. 6. – P. 1031–1055.
17. Rozvany George I.N., Lewiński T. Topology Optimization in Structural and Continuum Mechanics. – New York: Springer Science & Business Media, 2014. – 471 p.
18. Saurabh B., Naman J., Anadi M. Topological Optimization of 3D Structures by Optimality Criteria using ANSYS // International J. for Research in Emerging Science and Technology. – 2015. – V. 2. – Iss. 2. – P. 30–35.
19. Баничук Н.В. Оптимизация форм упругих тел. – М.: Наука, 1980. – 255 с.
20. Akash D., Anadi M. Topology Optimization of Bridge Structures Using Optimality Criteria Method // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – May 2015. – V. 3. – Iss. 5. – P. 1034–1038.

Поступила 21.11.2016 г.

Информация об авторах

Павлов С.П., доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования Физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

Крысько В.А., доктор технических наук, профессор кафедры математики и моделирования Физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

Бодягина К.С., магистрант физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

UDC 539.37

ON THE ISSUE OF OPTIMIZING THE SHAPE OF GEOLOGICAL EXCAVATIONS AND TOPOLOGY OF THEIR STRENGTHENING

Sergey P. Pavlov¹,
pspsar@yandex.ru

Vadim A. Krysko¹,
tak@san.ru

Xenia S. Bodyagina¹,
bodksen@mail.ru

¹ Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin,
77, Polytekhnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia.

Relevance. At mining and formation of excavation, the array natural stress-strain state, surrounding the extraction, changes. The result is the deformation of the rock and redistribution of stresses around the excavation, which could lead to its collapse. These stresses strongly depend on the shape of the cross section of the development and type of additional fortifications of the vault gallery. Thus, the ability to predict these processes, and especially to control them, developing optimal forms and types of arches strengthening, may reduce the probability of a tunnel destruction and increase their reliability.

The aim of the work is modeling and shape optimization of excavations in the form of long tunnels that can be considered under plane strain state; design of optimal topology of the supporting structure around the excavation for optimal form of arches, perceiving the main load of its own weight and the weight of the overlying rocks.

Methods. For mathematical modeling of the excavation behavior the authors have used the methods of finite and boundary elements for problems in mechanics of deformable body and the methods of elastic bodies forms optimization developed by the authors. For strengthening the arch of tunnels the method of topological optimization was used.

Results. The authors developed the algorithms and programs of optimization of shape and topology optimization for a planar problem of elasticity theory. By the example of the model problem the authors demonstrate the possibility of optimizing the arch shape of the excavation and its optimal external strengthening with the steel structure for reducing the maximum shear stress (criterion Cod), thus decreasing these stresses.

Key words:

Optimization of elastic body shape, topological optimization, Tresca criterion, method of finite and boundary elements, optimal form of a tunnel vaults.

The work was supported by the Grant RSF no. 16–11–10138.

REFERENCES

- Baklashov I.V. *Geomekhanika. T.1. Osnovy geomekhaniki* [Geomechanics. V. 1. Fundamentals of geomechanics]. Moscow, Publ. house of Moscow state mining University, 2004. 208 p.
- Baklashov I.V., Kartoziya B.A., Shashenko A.N., Borisov, N. *Geomekhanika. T. 2. Geomekhanicheskie protsessy* [Geomechanics. V. 2. Geomechanical processes]. Moscow, Publ. house of Moscow state mining University, 2004. 249 p.
- Rukovodstvo po proektirovaniyu podzemnykh vyrobotok i raschetu krepki (K SNiP II – 94–80)* [Guide for designing underground workings and calculation of supports (to SNIP II -94 – 80)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 272 p.
- Syrkin P.S., Martynenko I.A., Danilkin M.S. *Shakhtnoe i podzemnoe stroitelstvo. Tekhnologiya stroitelstva gorizontalnykh i naklonnykh vyrobotok* [Mining and underground construction. Construction technology of horizontal and inclined workings]. Novocherkassk, Shakhtinsky Institute YuRGTU Press., 2002. 430 p.
- Karetnikov V.N., Kleymenov V.B., Nuzhdikhin A.G. *Kreplenie kapitalnykh i podgotovitelnykh gornyykh vyrobotok: spravochnik* [Fastening capital and preparatory workings: handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 571 p.
- SNiP II-94–80. Stroitelnye normy i pravila. Normy proektirovaniya. Podzemnye gornye vyrobotki* [Building regulations. Design standards. Underground mining]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 30 p.
- Fadeev B.A. *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [Finite element method in geomechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 235 p.
- Crouch S., Starfield A. *Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela* [Boundary element methods in solid mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1987. 236 p.
- Pavlov S.P., Krysko V.A. *Optimizatsiya formy termouprugikh tel* [Shape Optimization of thermoelastic bodies]. Saratov, SGTU Publ. house, 2000. 160 p.
- Pavlov S.P., Zhigalov M.V. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya formy v odnoy ploskoy zadache uprugosti* [Mathematical modeling and optimization of shape in one plane problem of elasticity theory]. *Vestnik SGTU*, 2011, vol. 4 (59), no. 1, pp. 69–75.
- Pavlov S.P., Zhigalov M.V. *Upravlenie vneshney granitsej izoliruyushchego sloya nagretoy polosti* [Management of the external border of insulating layer of the heated cavity]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2005, no. 7, pp. 3–12.
- Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology Optimization. Theory, Methods and Applications*. Berlin, Springer, 2003. 370 p.
- Po Wu, Qihua Ma, Yiping Luo, Chao Tao *Topology Optimization Design of Automotive Engine Bracket*. *Energy and Power Engineering*, 2016, no. 8, pp. 230–235.

14. Ji-Hong Zhu, Kai-Ke Yang, Wei-Hong Zhang. Backbone cup – a structure design competition based on topology optimization and 3D printing. *Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim.*, 2016, vol. 7, no. A1, pp. 1–6.
15. Huang X., Xie Y.M. *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2010. 223 p.
16. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches. A comparative review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, vol. 48, no. 6, pp. 1031–1055.
17. Rozvany George I.N., Lewiński T. *Topology Optimization in Structural and Continuum Mechanics*. New York, Springer Science & Business Media, 2014. 471 p.
18. Saurabh B., Naman J., Anadi M. Topological Optimization of 3D Structures by Optimality Criteria using ANSYS. *International J. for Research in Emerging Science and Technology*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 30–35.
19. Banichuk N.V. *Optimizatsiya form uprugikh tel* [Optimization of forms of elastic bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 255 p.
20. Akash D., Anadi M. Topology Optimization of bridge structures using the criterion of optimality. *International journal of research in the field of applied science and engineering Technology (IJRASET)*, 2015, vol. 3, no. 5, pp. 1034–1038.

Received: 21 November 2016.

Information about the authors

Sergey P. Pavlov, Dr. Sc., professor, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin.

Vadim A. Krysko, Dr. Sc., professor, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin.

Xenia S. Bodyagina, graduate student, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin.

УДК 553.98(571)

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Исаев Валерий Иванович¹,
isaewi@tpu.ru

Искоркина Альбина Альбертовна¹,
iskorkina.a@mail.ru

Косыгин Владимир Юрьевич²,
kosyginv@inbox.ru

Лобова Галина Анатольевна¹,
lobovaga@tpu.ru

Осипова Елизавета Николаевна¹,
osipovaen@list.ru

Фомин Александр Николаевич³,
fominan@ipgg.sbras.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Вычислительный центр ДВО РАН,
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

Актуальность. Арктические районы Западной Сибири имеют уникальные палеоклиматические особенности, инверсионную тектоническую историю в палеоген-неогене, значительные вариации геохимических характеристик нефтематеринских отложений. Это обуславливает необходимость совершенствовать схемы и параметры количественной оценки ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом, основанным на палеорекострукциях геотермического режима материнских отложений.

Цель исследований: оценить влияние факторов палеоклимата – векового хода температур на земной поверхности и неоплейстоценовых толщ мерзлоты, ледниковых покровов, в комплексе с фактором эрозионных процессов, – на расчетный геотермический режим нефтематеринской баженовской свиты.

Объект исследований: баженовские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытые глубокими скважинами на Арктической, Среде-Ямальской и Ростовцевской площадях (п-ов Ямал).

Методика исследований базируется на оригинальном компьютерном палеотемпературном моделировании, учитывающем параметры седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи, включающей вечномерзлые породы и ледники, и не требующем априорных сведений о величинах и природе глубинного теплового потока.

Результаты исследований по выявлению и учету параметров денудаций, в комплексе с оценкой роли и учетом палеоклиматических характеристик, позволили сделать выводы и дать рекомендации. При определении ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом на землях арктического региона рекомендуется применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300–600 м. В случае неучета вечной мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы УВ могут быть занижены до 40–50 %. Сформулированы задачи предстоящих исследований, среди которых оценка роли палеоклиматических факторов в термической истории нефтематеринской китербютской свиты и разработка формализованных сценариев выявления и количественной оценки перерывов осадконакопления и размывов по данным геотермии.

Ключевые слова:

Палеоклимат, инверсионная тектоника, геотермический режим, нефтематеринские баженовские отложения, п-ов Ямал.

Введение

В рамках новой парадигмы развития сырьевой базы углеводородов РФ главными объектами прогнозирования и поисков становятся арктические районы Западной Сибири и сланцевые ресурсы баженовской свиты. Для реализации новой парадиг-

мы требуется создание новой фундаментальной теоретической базы и технологий поисков [1].

Оценка перспектив нефтегазоносности – оценка плотности ресурсов углеводородов и районирование территорий, зон нефтегазоаккумуляции – выполняется объемно-генетическим методом (бассей-

новое моделирование). Количество генерированных углеводородов (УВ) рассчитывается на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений [2, 3].

Новейшими исследованиями методом палеотемпературного моделирования, на примере нефтематеринских баженовских отложений, вскрытых скважиной Арктическая 11 на п-ове Ямал, установлено [4], что неучет векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских отложений. При определении ресурсов УВ объёмно-генетическим методом на землях арктического региона Западной Сибири рекомендовано применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты.

В публикации Арктической экспедиции IODP 302 [5] приводятся результаты построения и анализа объединенной литосферно-бассейновой термальной модели (система PetroProb) в пределах Хребта Ломоносова. Для учета палеоклиматического фактора авторами построен «местный» (для района Хребта Ломоносова) вековой ход температур на земной поверхности, начиная со 100 млн лет назад. Для этого использовались результаты палинологического и изотопного анализа углерода органического вещества. Здесь следует отметить, что «местный» вековой ход температур на земной поверхности [5], в интервале геологического времени 100–4 млн лет назад, идеально совпадает с «арктическим» вековым ходом температур на земной поверхности [4], независимо построенным в результате сводки и обобщения экспериментальных определений и палеоклиматических реконструкций для севера Западно-Сибирской низменности.

В заключении S. Nelskamp с соавторами отметили, что эволюционирование температур на земной поверхности оказывает большое влияние на зрелость нефтематеринской породы: в зависимости от временных вариаций поверхностных температур могут быть большие или меньшие объемы получаемых УВ.

Основная цель настоящих исследований – дальнейшая аргументация существенного влияния 2-х факторов палеоклимата – векового хода температур на земной поверхности и неоплейстоценовых толщ мерзлоты – на расчетный геотермический режим нефтематеринских свит, определяющий подсчет плотности ресурсов. Для этого выполнены палеотемпературные исследования баженовских отложений, вскрытых глубокими скважинами на Ростовцевском и Средне-Ямальском месторождениях п-ова Ямал.

Вместе с тем представляет интерес количественная оценка влияния 3-го фактора палеоклимата – позднечетвертичных ледниковых покровов – на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала материнских отложений Западной Сибири. Опреде-

ление роли ледниковых покровов приобретает особую актуальность при оценке перспектив нефтегазоносности арктических территорий Западной Сибири [3]. Для этого выполнено построение и приложение векового хода мощностей ледниковых покровов в четвертичное время.

Построение векового хода мощностей мерзлых пород в неоплейстоцене (северная палеоклиматическая зона Западной Сибири)

Вековой ход мощностей ледниковых покровов (северные широты 66–74°) построен на основе обобщения результатов детальных палеогеографических, стратиграфических исследований и палеокриологических реконструкций для севера Западно-Сибирской низменности, начиная с развития процессов оледенения в верхнем плейстоцене.

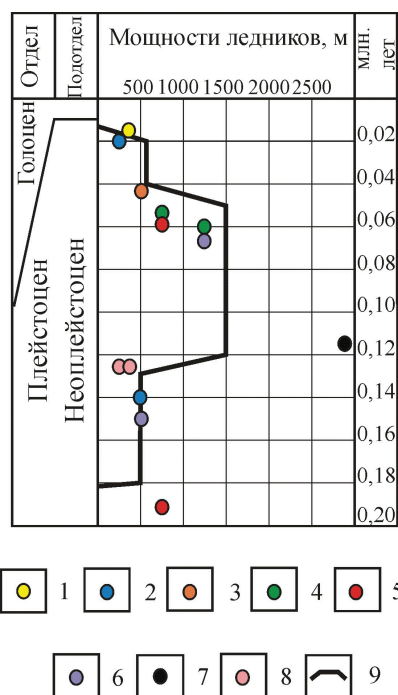


Рис. 1. Мощности ледников северной палеоклиматической зоны Западной Сибири в неоплейстоцене: 1–8 значения мощности ледников: 1 – по Глобальные изменения ... [7], 2 – по С.А. Архипову и др. [8], 3 – по С.В. Томирдиаро [9], 4 – по С.А. Лаухину [10], 5 – по Четвертичные оледенения ... [11]; 6 – по Е.В. Артюшкову [12]; 7 – по В.В. Баулину [6], 8 – по Ю.Б. Бадю [13]; 9 – кусочно-линейная аппроксимация векового хода мощностей ледников

Fig. 1. Capacities of glaciers of a northern paleoclimatic zone of Western Siberia in Pleistocene: 1–8 the value of power of glaciers: 1 – on Global changes ... [7], 2 – after S.A. Arkhipov et al. [8], 3 – after S.V. Tomirdiaro [9], 4 – after S.A. Laukhin [10], 5 – on the Quaternary freezing ... [11]; 6 – after E.V. Artyushkov [12]; 7 – after V.V. Baulin [6], 8 – after Yu.B. Badu [13]; 9 is the piecewise and linear approximation of the secular variation of glaciers capacity

На рис. 1 изображен вековой ход мощностей ледниковых покровов в четвертичное время для северной палеоклиматической зоны Западной Сиби-

ри, начиная с развития процессов оледенения в сарматовское время [6] и заканчивая деградацией ледников в конце сартанского времени [7].

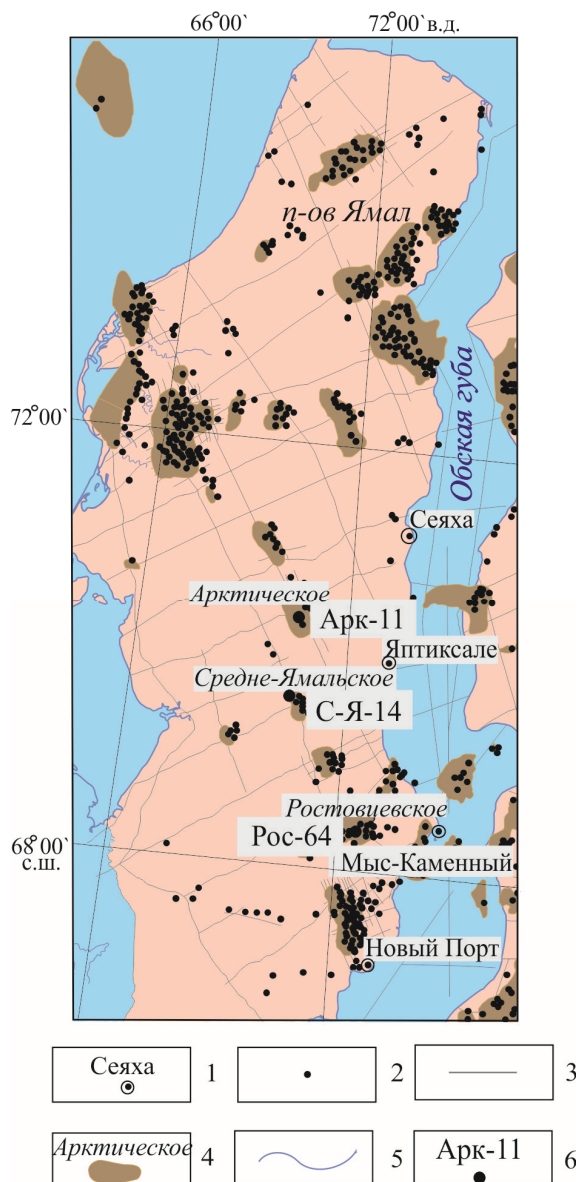


Рис. 2. Обзорная схема территории исследований: 1 – населенный пункт и его название; 2 – поисково-разведочная скважина; 3 – сейсмический профиль работ МОГТ 2D; 4 – контур месторождения и его название (объекты экспериментальных исследований); 5 – гидрография и береговая линия; 6 – моделируемая скважина и ее индекс: Арк-11 – Арктическая 11, С-Я-14 – Средне-Ямальская 14, Рос-64 – Ростовцевская 64

Fig. 2. Review scheme of the studied area: 1 is the locality and its name; 2 is the exploration well; 3 is the seismic profile of works MOGT 2D; 4 is the contour of the field and its name; 5 is the hydrography and coastline; 6 is the well simulated and its index: Арк-11 – Arkticheskaya 11, С-Я-14 – Sredne-Yamalskaya 14, Рос-64 – Rostovtsevskaya 64

Объект исследований

Моделирование палеогеотемпературных условий нефтематеринских баженовских отложений выполнено для палеоклиматических и геолого-геофизических условий арктических районов Западной Сибири в ходе исследований на площадях глубокого бурения месторождений углеводородов п-ова Ямал, расположенных на разных широтах (рис. 2, табл. 1).

Осадочный мезозойско-кайнозойский чехол территории исследования начинает формироваться в ранней юре. К концу волжского века трансгрессия моря расширилась, идет накопление баженовской свиты (J_3+K_1, bg), обогащенной органическим веществом.

Нефтематеринская баженовская свита является основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового нефтегазоносных комплексов (НГК), а также приоритетной сланцевой формацией. Однако, в отличие от юго-западных районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [14], баженовские отложения в арктической зоне существенно варьируют как по концентрациям рассеянного органического вещества (РОВ), нередко уменьшаясь до 1–2 %, так и по типу РОВ, переходя к гумусово-сапропелловому типу.

Начиная с апт-сеномана, морской режим господствует до начала эоцена. Раскрытие котловины Арктического бассейна приводит к смене знака вертикальных тектонических движений и наступает позднеэоценовая регрессия. Анализ мощностей палеоген-неогена [15] показывает, что кровля люлинвора (ирбита) могла быть подвергнута денудации. При этом размывтый слой мог составить порядка 500–700 м.

Дискуссия о перерывах в осадконакоплении, эрозиях на рубеже позднего палеогена и эоцена в арктической зоне Западной Сибири продолжается по сей день [16–18]. Наличие перерывов в осадконакоплении и размывов установлено однозначно, однако их объем и временные привязки однозначно не определены.

Анализ предварительно выполненных нами палеотектонических и палеотемпературных реконструкций свидетельствует о том, что накопление шло до середины миоцена на протяжении 31,9 млн лет (нюрольская, тавдинская, атлымская, новомихайловская, туртасская, абросимовская свиты) в объеме 335–535 м и за 4 млн лет, в раннебищеульское время, эти отложения были размывты.

Ингрессиям бореального моря в среднем миоцене – раннем плиоцене, с конца бищеульского времени и до конца новопортовского, обязаны накопления осадков толщиной 113 м, которые в последующий этап положительных тектонических движений, за 1,3 млн лет, денудировуются. С началом позднего миоцена идет накопление плиоцен-четвертичных озерно-аллювиальных осадков.

Таблица 1. Характеристика разрезов скважин Арктического, Средне-Ямального и Ростовцевского месторождений

Table 1. Characteristic of the sections of Arcticheskaya 11, Sredne-Yamalskaya 14 and Rostovtsevskaya 64 wells

Характеристики/Characteristics	Значение/Value		
	Скважина/Well		
	Арктическая 11 Arcticheskaya 11	Средне-Ямальская 14 Sredne-Yamalskaya 14	Ростовцевская 64 Rostovtsevskaya 64
Забой, м/Bottom, m	3624	3383	3485
Отложения на забое (свита) Sediments at the bottom (suite)	Левинская (J ₁ lv) Levinskaya	Надояхская (J ₁ +J ₂ nd) Nadoyahskaya	Леонтьевская (J ₂ ln) Leontjevskaya
Кровля баженовской свиты (J ₃ +K,bg), м Roof of the Bazhenov suite (J ₃ +K,bg), m	2792	2855	3162
Мощность баженовской свиты, м Capacity of the Bazhenov suite, m	16	35	33
Мощность палеогеновых отложений в современном разрезе, м Capacity of the Paleogene deposits in the current section, m	223	350	400
Мощность неоген-четвертичных отложений в современном разрезе, м Capacity of the Neogene-Quaternary deposits in the current section, m	280	200	266
Размыв палеоген-неогеновых отложений (14,5–18,5 млн лет назад), м Scour of the Paleogene-Neogene deposits (14,5–18,5 million years ago), m	535	435	335
Размыв неогеновых отложений (4,1–5,4 млн лет назад), м Scour of the Neogene deposits (4,1–5,4 million years ago), m	113	113	113
Мощность вечномерзлых пород в плиоцен-квартере (0,52–0,18 млн лет назад), м Capacity of the permafrost rocks in the Pliocene-Quaternary (0,52–0,18 million years ago), m	600	600	600
Мощность вечномерзлых пород в плиоцен-квартере (0,18–0,0 млн лет назад), м Capacity of permafrost rocks in the Pliocene-Quaternary (0,18–0,0 million years ago), m	300	300	300
Мощность ледникового покрова в неоплейстоцене (0,18–0,13 млн лет назад), м Capacity of glacial cover in the Neo-Pleistocene (0,18–0,13 million years ago), m	500	500	500
Мощность ледникового покрова в неоплейстоцене (0,13–0,05 млн лет назад), м Capacity of glacial cover in the Neo-Pleistocene (0,13–0,05 million years ago), m	1500	1500	1500
Мощность ледникового покрова в неоплейстоцене (0,05–0,015 млн лет назад), м Capacity of glacial cover in the Neo-Pleistocene (0,05–0,015 million years ago), m	500	500	500
Результаты испытаний верхнеюрских-нижнемеловых пластов (свита; пласт; тип флюида; дебит, м ³ /сут) Results of the test of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous layers (suite; layer; fluid type; output, m ³ /d)	Не испытывались Not tested		Ахская; БЯ ₉₋₁₀ ; газ, 210 тыс.; конденсат, 35,2; вода, 1,5 Akhskaia; BYa ₉₋₁₀ ; gas, 210 thousand; condensate, 35,2; water, 1,5 Ахская; БЯ ₉₋₁₀ ; вода, 3,9 Akhskaia; BYa ₉₋₁₀ ; water, 3,9 Ахская; НП ₂₋₃ ; газ, 6,4 тыс. Akhskaia; NP ₂₋₃ ; gas, 6,4 thousand Ахская; НП ₅₋₆ ; газ, 11,5 тыс.; нефть, 6,5 Akhskaia; NP ₅₋₆ ; gas, 11,5 thousand; oil, 6,5 Ахская; НП ₅₋₇ ; нефть, 4,2 Akhskaia; NP ₅₋₇ ; oil, 4,2 Ахская; Ач-1; сухо Akhskaia; Ach-1; dry Баженовская; сухо Bazhenov; dry
Измеренные пластовые температуры (свита; глубина замера, м; температура, °С) Measured reservoir temperatures (suite; measurement depth; temperature, °C)	Левинская/Levinskaya; 3533; 125 Левинская/Levinskaya; 3560; 126	Марресалинская Marresalinskaya; 846; 17	Ахская/Akhskaia; 2470; 75 Ахская/Akhskaia; 2650; 81 Ахская/Akhskaia; 2660; 81
«Измеренные» температуры по ОСВ (глубина отбора, м; (R ⁰ _{ит}); температура, °С) Measured temperatures by reflective ability of a vitrinite (selection depth; (R ⁰ _{ит}); temperature, °C)	2000; (0,65); 100 2500; (0,80); 120	1700; (0,52); 83 2200; (0,65); 100 3000; (0,80); 120	2096 м; (0,53); 84 2600; (0,63); 98 2827; (0,73); 111

В случае учета эрозийных процессов при моделировании по критерию «невязки» измеренных (наблюденных) и расчетных геотемператур результаты являются оптимальными: «невязки» составляют порядка ± 2 °С, размывы палеоген-неогено-

вых отложений (335–535 м) и неогеновых отложений (113 м) подтверждаются. А результаты моделирования без учета эрозийных процессов однозначно неприемлемы, «невязки» составляют $\pm(5-12-16)$ °С.

О методике исследований

Для исследований применен метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей, реализованный в программном обеспечении ТеплоDialog [14, 19, 20].

Расчет палеотемператур состоит из двух этапов. На первом, по распределению температур T , «наблюденных» в точках разреза скважины, рассчитывается тепловой поток q через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решается обратная задача геотермии – классическая обратная задача геофизики. На втором этапе, с известным значением q решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются температуры U в заданных точках осадочной толщи Z (в том числе в материнской свите) на любые заданные моменты геологического времени t .

Для решения *обратной задачи геотермии* используем в качестве «наблюденных» как измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин, так и палеотемпературы, определенные по отражательной способности витринита (ОСВ) (табл. 1).

Первое краевое условие модели определяется температурой поверхности осадконакопления, т. е. фактором палеоклимата, и задается в виде кусочно-линейной функции «арктического» векового хода температур на поверхности Земли [4].

Параметризация осадочного разреза, вскрытого скважиной, определяющая параметры седиментационной и теплофизической модели, принимается в соответствии с литолого-стратиграфической разбивкой скважины (табл. 2).

Наличие перерывов в осадконакоплении и величины денудации подтверждены и оценены путем многовариантных расчетов при различных сценариях тектоно-седиментационной истории и последующего выбора сценария, отвечающего критерию «невязки».

Формирование, существование, деградация толщи вечномерзлых пород [4] и ледникового покрова (рис. 1) учитываются как своеобразные динамические литолого-стратиграфические комплексы, обладающие аномально высокими значениями теплопроводности λ и температуропроводности a . А накапливающийся материал ледника представлен аномально низкой плотностью σ .

Формализованный учет толщи мерзлоты осуществляется начиная с 0,52 млн лет назад «мгновенной» (по меркам геологического времени, за 0,3+3,0 тыс. лет) заменой «нормальных» осадочных отложений 600-метровой толщиной мерзлых пород со своими теплофизическими характеристиками. Затем эта толща мерзлых пород перекрывает осадочный чехол в течение 334 тыс. лет. Далее «мгновенно» (0,3+0,15+0,15 тыс. лет) толща мерзлых пород деградирует в объеме 300 м. И далее

вечномерзлые породы существуют в объеме 300 м до настоящего времени, в последние 182 тыс. лет.

Учет толщи ледникового покрова осуществляется начиная с 0,182 млн лет назад. За 5 тыс. лет сформировался 500-метровый ледник со своими теплофизическими характеристиками и просуществовал в таком объеме 47 тыс. лет. Затем, за 10 тыс. лет, мощность ледника выросла до 1500 м, и в таком объеме он существует 70 тыс. лет. Далее, за 10 тыс. лет, ледник сокращается до 500 м и существует в течение 20 тыс. лет. К моменту 15 тыс. лет назад (конец сартанского времени) ледник полностью деградирует.

Решение *прямых задач геотермии* выполнялось на 52 ключевых момента геологического времени, соответствующих временам начала/завершения формирования каждой свиты, перекрывающей материнскую баженовскую, а также точкам «излома» векового хода температур на земной поверхности и «переломным» моментам формирования и деградации неоплейстоценовой мерзлоты, ледникового покрова.

Модель процессов нефтегазообразования [21] позволяет по геотемпературному критерию выполнить выделение очагов интенсивного образования нефтей из РОВ материнских отложений: пороговая геотемпература вхождения в главную зону нефтеобразования (ГЗН) $U \geq 95$ °C для РОВ гумусово-сапропелевого типа.

Количественное определение влияния палеоклимата на расчетный геотермический режим и на оценки степени реализации генерационного потенциала материнских отложений выполняется на основе анализа варибельности результатов пяти вариантов палеотемпературных реконструкций. *Вариант 1* – без учета факторов палеоклимата. *Вариант 2* – учет «стандартного» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. *Вариант 3* – учет «арктического» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. *Вариант 4* – учет «арктического» векового хода температур, учет динамики неоплейстоценовой мерзлоты, без учета ледников. *Вариант 5* – учет «арктического» векового хода температур, учет динамики неоплейстоценовой мерзлоты и ледников.

Основным критерием адекватности и предпочтительности результатов палеотемпературного моделирования выступает оптимальная согласованность («невязка») максимума расчетных геотемператур с «наблюденными» температурами «максимального палеотермометра» – с температурами, определенными по ОСВ. В той же степени важна оптимальная «невязка» расчетных геотемператур и с «наблюденными» пластовыми температурами. Оптимальная «невязка», принятая в классической разведочной геофизике, – это средняя квадратичная разность расчетных и наблюдаемых значений, равная погрешности наблюдений [22]. Эта погрешность порядка ± 2 °C.

Таблица 2. Пример параметрического описания седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Ростовцевская 64

Table 2. Parametrical description of history sedimentation and thermal properties of sedimentary thickness opened with the Rostovskaya well 64

Свита, толща (стратиграфия) Suite, strata (stratigraphy)	Мощность, м Thickness, m	Возраст, млн лет назад Age, million years ago	Время накопления, млн лет Accumulation time, million years	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Теплопроводность, Вт/м·град Thermal conductivity, W/m·deg	Температуропро- водность, м ² /с Thermal diffusivity, m ² /s	Тепловыделение, Вт/м ³ Heat generation W/m ³
Неоплейстоцен/Neo-Pleistocene Q-N ₂	-	0,00–0,015	0,015	-	-	-	-
	-500	0,015–0,02	0,005	-	-	-	-
	-	0,02–0,04	0,02	-	-	-	-
	-1000	0,04–0,05	0,01	-	-	-	-
	-	0,050–0,120	0,070	-	-	-	-
	+1000	0,120–0,130	0,010	0,92	2,25	1,2e-006	1,22e-007
	-	0,130–0,177	0,047	-	-	-	-
	+500	0,177–0,182	0,005	0,92	2,25	1,2e-006	1,22e-007
	300	0,1820–0,18215	0,00015	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
	300	0,18215–0,1823	0,00015	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	-600	0,1823–0,1826	0,0003	-	-	-	-
	-	0,1826–0,5167	0,3341	-	-	-	-
600	0,5167–0,5197	0,003	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006	
-600	0,5197–0,520	0,0003	-	-	-	-	
Квартер+плиоцен Q-N ₂ /Quarter+Pliocene	266	0,520–4,1	3,58	2,04	1,29	6,5e-007	1,1e-006
N ₁₋₂	-113	4,1–5,4	1,3	-	-	-	-
Новопортовская N ₁₋₂ /Novoportovskaya	50	5,4–8,4	3	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Таволжанская N ₁ /Tavolzhangskaya	25	8,4–12,5	4,1	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Бищеульская bsch N ₁ /Bishcheulskaya	38	12,5–14,5	2	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
N ₁	-335	14,5–18,5	4	-	-	-	-
Абросимовская N ₁ /Abrosimovskaya	20	18,5–23,0	4,5	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Туртасская tur P ₃ /Turtasskaya	50	23,0–28,0	5	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Новомихайловская nvm P ₃ /Novomikhaylovskaya	35	28,0–30,0	2	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Атлымская atl P ₃ /Atlymskaya	65	30,0–34,0	4	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Тавдинская tv P ₃ /Tavdinskaya	110	34,0–42,6	8,6	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Нюрольская nl P ₃ /Nyurovskaya	55	42,6–50,4	7,8	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Ирбитская P ₃ ir/Irbitskaya	180	50,4–55,0	4,6	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Серовская P ₃ sr/Serovskaya	100	55,0–58,0	3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Тибейсалинская P ₃ tb/Tibeysalinskaya	40	58,0–63,7	5,7	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Ганькинская K ₂ +P ₃ gn/Gankinskaya	80	63,7–73,0	9,3	2,11	1,37	7e-007	1,25e-006
Березовская K ₂ b/Berezovskaya	338	73,0–89,0	16	2,15	1,41	7,5e-007	1,25e-006
Кузнецовская K ₂ kz/Kuznetsovskaya	18	89,0–92,0	3	2,18	1,43	8e-007	1,25e-006
Марресалинская K ₂ -K ₁ mr/Marresalinskaya	466	92,0–102,0	10	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Яронгская K ₁ jar/Yarongskaya	206	102–108,5	6,5	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Танопчинская K ₁ tn/Tanopchinskaya	718	108,5–133,2	24,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Ахская K ₁ ah/Akhsakaya	750	133,2–142,7	9,5	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская J ₃ +K ₁ bg/Bazhenovskaya	33	142,7–149,3	6,6	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Нурминская J ₂ nr/Nurminskaya	72	149,3–161,7	12,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Мальшевская J ₂ ml/Malyshevskaya	105	161,7–171,0	9,3	2,45	1,63	8e-007	1,3e-006
Леонтьевская J ₂ ln/Leontyevskaya	113	171,0–173,0	2	2,47	1,65	8e-007	1,3e-006
Мощность разреза, м/Section capacity, m	3485						

Примечание. Коричневой заливкой показаны времена накопления нефтематеринской баженовской свиты и ее параметрическое описание; серой – размывы палеоген-неогеновых отложений; синей – времена формирования, существования и деградации толщи мерзлоты; светло-синей – времена формирования, существования и деградации толщи ледников.

Note. Accumulation time of Bazhenov petromaternal suites and its parametric description are filled with brown. Erosion of the Paleogene-Neogene deposits is filled with grey. Times of «instant» formation and «instant» degradation of the Neo-Pleistocene permafrost thickness are filled with blue. Time of existence and degradation of glaciers thickness is filled with dark blue.

В качестве второго основного критерия адекватности и предпочтительности результатов принята степень согласованности очагов интенсивной генерации УВ, выделяемых по геотемпературному критерию в материнских свитах, с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр.

Важным критерием достоверности результатов палеотемпературного моделирования является согласованность расчетных значений плотности теплового потока q с данными экспериментального определения плотности теплового потока на территории исследований.

Для сопоставительной оценки вариантов моделирования для материнской свиты выполняется экспресс-расчет интегрального показателя плотности ресурсов генерированных нефтей (R , усл. ед.) по формуле [23]:

$$R = \sum_{i=1}^n (U_i t_i \cdot 10^{-2}),$$

где U_i – расчетная геотемпература очага генерации нефти, °С; t_i – интервальное время действия очага – нахождения материнских отложений в ГЗН, млн лет; количество временных интервалов n определено числом интервалов геологического времени нахождения материнских отложений в ГЗН. Как следует из принятой формулы, расчетное значение плотности генерированных ресурсов (на участке скважины) напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН.

Эффективность метода исследований заключается в следующем:

1. В отличие от известных систем бассейнового моделирования (ГАЛА – российская, Temis, PetroProb, PetroMod – зарубежные, реализующие палеотемпературное моделирование), используемая модель в программном обеспечении палеотемпературного моделирования ТеплоDialog не требует априорных сведений о природе и величине глубинного теплового потока q из основания осадочного разреза. Глубинный тепловой поток определяется решением обратной задачи геотермии – классической обратной задачи разведочной геофизики. Решение обратной задачи выполняется в рамках параметрического описания седиментационной истории и истории теплофизических свойств только осадочной толщи, без привлечения сведений о геодинамике ниже основания осадочного разреза. В то время как известна сложность и неоднозначность определения теплового потока из основания осадочной толщи, базирующегося в системах ГАЛА, Temis, PetroProb и PetroMod на моделях рифтинга литосферы («defined rift phases») [3, 5, 24, 25].
2. Для геодинамических условий Западной Сибири, характеризующихся начиная с юрского времени, квазистационарностью глубинного

теплового q [26, 27], решение обратной задачи геотермии – определения q – в системе ТеплоDialog выполняется однозначно.

3. В математическую модель, реализованную в ТеплоDialog, непосредственно, в строгой математической форме, включены палеотемпературы из определений отражательной способности витринита, как «наблюденные». Геотемпературы из ОСВ используются аналогичным образом, как и измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин. Для геотемператур по ОСВ учитывается время срабатывания «максимального палеотермометра». Никаких отдельных «калибровок» по температурам ОСВ выполнять не требуется.

Анализ влияния факторов палеоклимата на расчетный геотермический режим и оценку степени реализации генерационного потенциала баженовских отложений

В работе [4] выполнен анализ результатов палеотектонических и палеотемпературных реконструкций осадочного разреза, включающего баженовскую свиту, для скважины Арктическая 11. Отметим, что в указанной работе анализ выполнен без учета влияния ледниковых покровов. В настоящей статье выполнен детальный анализ влияния более полного комплекса палеоклиматических факторов (мезозойско-кайнозойский вековой ход температур на поверхности Земли, вековой ход мощностей неоплесточеновой мерзлоты и вековой ход мощностей позднечетвертичных ледниковых покровов), на примере скважины Ростовцевская 64, с последующим сводным анализом по всем трем скважинам (рис. 2).

Анализ расчетных значений плотности теплового потока q из основания осадочного разреза (табл. 3) показывает следующее. В вариантах 1, 3, 4 и 5 тепловой поток увеличивается на 2,4–2,6–3,6–2,4 мВт/м² по отношению к расчетному значению теплового потока варианта 2 – 46,7 мВт/м².

Анализ термической истории баженовской свиты (табл. 3) в разрезе скважины Ростовцевская 64 свидетельствует о том, что в варианте 1 (без учета всех факторов палеоклимата) материнская свита «пережила» самую короткую и самую «холодную» главную фазу нефтеобразования (ГФН).

В вариантах 2, 3, 4 и 5 (с учетом факторов палеоклимата) баженовская свита имеет «богатые» термические истории ГФН. Главные фазы нефтеобразования этих вариантов имеют разные значения абсолютных максимумов палеотемператур.

В варианте 4 присутствие толщи вечномерзлых пород, обладающих высокими значениями теплопроводности λ и температуропроводности a , приводит к увеличению расчетных значений плотности теплового потока q , что, в свою очередь, увеличивает расчетные геотемпературы материнских отложений.

Таблица 3. Расчетные геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Ростовцевская 64

Table 3. Calculated geotemperatures of the Bazhenov suite in the section of Rostovskaya 64 well

Время, млн лет назад Time, million years ago	«Стандартный» вековой ход, °C «Standard» century course, °C	«Арктический» вековой ход, °C «Arctic» secular variation, °C	Мощность мерзлых пород, м Capacity of permafrost rocks, m	Мощность ледников, м Capacity of glaciers, m	Глубина положения баженовской свиты, м Basement depth of Bazhenov suite, m	Геотемпературы баженовской свиты, °C Geotemperatures of Bazhenov suite, °C					
						Вариант/Variant					
						5					
						1	2	3	4	Геотем- пературы Geotem- peratures	Глубина положения баженовской сви- ты, м (с учетом ледникового покрова) Basement depth of Bazhenov suite, m (taking into account a glacial cover)
0	0	-4	300	-	3179	106	101	98	96	98	3179
0,015	-2	-10	300	-	3178	106	100	98	96	97	3179
0,02	-3	-8	300	500	3177	106	100	98	96	96	3679
0,03	-4	-5	300	500	3177	106	100	98	96	95	3679
0,04	-2	-6	300	500	3177	106	100	98	96	95	3679
0,05	-1	-7	300	1500	3176	106	101	98	95	94	4679
0,07	-4	-4	300	1500	3174	106	101	97	95	93	4679
0,11	-4	-5	300	1500	3172	106	101	97	94	92	4679
0,12	-2	-6	300	1500	3171	106	101	97	93	91	4679
0,13	-1	-7	300	500	3171	106	101	97	93	91	3679
0,15	-4	-6	300	500	3169	106	101	96	93	91	3679
0,177	-6	-7	300	500	3167	106	101	96	93	91	3679
0,182	-6	-7	300	-	3167	106	101	96	93	91	3179
0,1826	-7	-7	600	-	3167	105	101	96	93	91	3167
0,20	-7	-8	600	-	3166	105	102	96	93	91	3166
0,24	-10	-9	600	-	3163	105	102	96	93	91	3163
0,5167	-6	-10	600	-	3145	104	102	94	98	95	3145
0,5197	-5	-11	-	-	3145	104	102	94	98	95	3145
0,52	-5	-11	-	-	3145	104	102	94	98	95	3145
1,8	-3	-13	-	-	3062	101	99	93	95	93	3062
3,2	-2	+5	-	-	2971	98	97	103	105	103	2971
4,1	+3	+4	-	-	2913	97	96	102	103	101	2913
4,9	+5	+4	-	-	2983	99	97	104	106	103	2983
5,4	+5	+4	-	-	3026	100	100	105	107	105	3026
8,4	+9	+5	-	-	2976	98	100	104	106	104	2976
10	+9	+6	-	-	2966	98	101	105	106	104	2966
12,5	+10	+6	-	-	2951	97	101	104	106	104	2951
14,5	+10	+6	-	-	2913	97	102	104	106	104	2913
18,5	+11	+7	-	-	3248	109	113	117	119	116	3248
23	+4	+8	-	-	3228	108	108	117	119	116	3228
28	+8	+8	-	-	3178	106	109	114	117	115	3178
30	+10	+9	-	-	3143	105	108	114	116	114	3143
34	+11	+9	-	-	3078	102	109	112	114	111	3078
35	+14	+9	-	-	3065	102	111	112	113	111	3065
42,6	+20	+12	-	-	2968	98	114	111	112	111	2968
50	+21	+15	-	-	2916	96	112	111	113	111	2916
50,4	+21	+15	-	-	2913	96	112	111	113	111	2913
55	+21	+15	-	-	2733	88	105	104	106	104	2733
58	+20	+16	-	-	2633	85	101	101	102	101	2633
63,7	+19	+16	-	-	2593	85	101	101	102	101	2593
70	+19	+16	-	-	2539	83	98	99	101	99	2539
73	+19	+15	-	-	2513	82	97	97	99	97	2513
85	+19	+13	-	-	2260	72	89	86	87	86	2260
89	+20	+13	-	-	2175	69	86	83	85	83	2175
92	+20	+13	-	-	2157	69	86	83	84	82	2157
100	+22	+15	-	-	1784	55	74	71	72	71	1784
102	+22	+15	-	-	1691	52	71	68	70	68	1691
108,5	+22	+15	-	-	1485	46	65	62	62	61	1485
120	+22	+16	-	-	1151	35	55	51	52	51	1151
134	+21	+15	-	-	704	21	42	36	37	37	704
135	+22	+15	-	-	625	19	40	34	35	34	625
142,5	+22	+15	-	-	33	1	23	16	16	16	33
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м ² Calculated heat flow from the basement, mW/m ²						49,1	46,7	49,3	50,3	49,1	

Отметим, что учет ледникового покрова (*вариант 5*) мало повлиял на величину расчетного значения плотности теплового потока из основания q , и на интенсивность и продолжительность ГФН.

Сопоставление расчетных и «наблюденных» геотемператур для 3-х скважин приведено в табл. 4. Так как «наблюденные» (измеренные) температуры (включая определенные по ОСВ) имеют погрешность порядка ± 2 °С, то *варианты 1 и 2* решений *нельзя признать приемлемыми*. В этих вариантах «невязки» превышают оптимальную в 2 раза и много больше, а в *варианте 1* разница с ОСВ достигает 11–12 °С.

В случае учета палеоклимата (*варианты 3, 4 и 5*) как «невязки» для пластовых температур, так и сходимость с «максимальным палеотермометром» оптимальны и примерно равноценны. Несколько иные результаты получены для скважины Средне-Ямальская 14. Здесь оптимальным (приемлемым) можно признать, пожалуй, только *вариант 4*.

Расчет интегрального показателя R (табл. 5) – экспресс-расчет плотности ресурсов генерированных ресурсов *баженовских нефтей* – дает максимальное или несколько большее значение для *варианта 4*, приемлемого по критерию «невязки». В этом варианте, помимо учета «арктического» векового хода температур на дневной поверхности, учтена динамика неоплейстоценовой мерзлоты.

Максимальные значения для скважин Средне-Ямальская 14 и Ростовцевская 64 (*вариант 4*: 73, 76 усл. ед.) примерно те же, что и в *варианте 3* (72, 77 усл. ед.), в котором учтен только один фактор палеоклимата – вековой ход температур, но на 40–50 % больше, чем в *варианте 1* (53, 51 усл. ед.), в котором не учтен ни один фактор палеоклимата.

Примечание. Вариант 1 – без учета факторов палеоклимата. Вариант 2 – учет «стандартного» векового хода температур [28, 29], без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. Вариант 3 – учет «арктического» векового хода температур [4], без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. Вариант 4 – учет «арктического» векового хода температур и динамики неоплейстоценовой мерзлоты. Вариант 5 – учет «арктического» векового хода температур, динамики неоплейстоценовой мерзлоты и льда. Коричневой заливкой показаны температуры главной фазы нефтеобразования (ГФН), темно-коричневой заливкой – палеотемпературный максимум ГФН. Серой заливкой обозначены времена размыва палеоген-неогеновых отложений.

Note. Variant 1 – excluding paleoclimate factors. Variant 2 – considering «standard» secular variation of temperatures [28, 29], without Neo-Pleistocene permafrost and glaciers. Variant 3 – considering «arctic» secular variation of temperatures [4], without Neo-Pleistocene permafrost and glaciers. Variant 4 – considering «arctic» secular variation of temperatures and dynamics of Neo-Pleistocene permafrost. Variant 5 – considering «arctic» secular variation of temperatures and dynamics of Neo-Pleistocene permafrost and the ice. Brown shaded areas indicate temperatures of the major oil generation zone (GFN), dark-brown colour shading indicates paleotemperature maxima GFN, grey shading shows the erosion times of Paleogene-Neogene sediments.

Таблица 4. Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур в скважинах Арктического, Средне-Ямальского и Ростовцевского месторождений

Table 4. Comparison of the measured and calculated geotemperatures in the wells of Arctic, Sredne-Yamal and Rostovtsev fields

Глубина, м/Depth, m	Измеренные температуры, °С Measured («observed») temperatures, °С	Способ измерения Measurement method	Вариант/Variant									
			1		2		3		4		5	
			Значение/Value	Разница/Discrepancy	Значение/Value	Разница/Discrepancy	Значение/Value	Разница/Discrepancy	Значение/Value	Разница/Discrepancy	Значение/Value	Разница/Discrepancy
Скважина Арктическая 11/Arcticheskaya 11 well												
2000	100	по ОСВ	91	-9	97	-3	99	-1	102	+2	100	0
2500	120	by OSV	109	-11	115	-5	117	-3	121	+1	119	-1
3533	125	пластовые	133	+8	128	+3	126	+1	124	-1	126	+1
3560	126	in-place	133	+7	129	+3	127	+1	125	-1	126	0
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °С Mean squared error («true error»), °С			±9		±4		±2		±1		±1	
Скважина Средне-Ямальская 14/Sredne-Yamalskaya 14 well												
1700	83	по ОСВ by OSV	78	-5	80	-3	80	-3	81	-2	80	-3
2200	100		95	-5	96	-4	96	-4	97	-3	96	-4
3000	120		122	+2	121	+1	122	+2	122	+2	121	+1
846	17	пластовые in-place	36	+19	32	+15	28	+11	23	+6	29	+12
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °С Mean squared error («true error»), °С			±10		±8		±6		±4		±6	
Скважина Ростовцевская 64/Rostovtsevskaya 64 well												
2470	75	пластовые in-place	84	+9	80	+5	77	+2	75	0	77	+2
2650	81		90	+9	85	+4	82	+1	81	0	82	+1
2660	81		90	+9	86	+5	83	+2	81	0	83	+2
2096	84	по ОСВ by OSV	76	-8	81	-3	84	0	85	+1	83	-1
2600	98		92	-6	96	-2	99	+1	101	+3	99	+1
2827	111		99	-12	103	-8	106	-5	108	-3	106	-5
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °С Mean squared error («true error»), °С			±9		±5		±2		±2		±2	

Примечание. Коричневой заливкой показаны варианты оптимальные (приемлемые) по критерию «невязки».

Note. The optimal variants (accepted) by «residual» criterion are shown in brown filling.

Достоверность результатов палеотемпературного моделирования, выполненного на Арктической, Средне-Ямальской и Ростовцевской площадях, подтверждается хорошей согласованностью по-

лученных расчетных значений плотности теплового потока (50–51–58 мВт/м²) с экспериментальными определениями плотности теплового потока для п-ва Ямал: 50–55 мВт/м² [27], 49–56 мВт/м² [30].

Как сообщалось выше, баженовская свита является основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового НГК, а также возможной сланцевой формацией. В этой связи важно оценить согласованность очагов интенсивной генерации баженовских нефтей, выделенных по геотемпературному критерию в разрезах скважин, с результатами испытаний верхнеюрских и нижнемеловых пластов (табл. 1). Но, к сожалению, в этих скважинах верхнеюрский НГК не испытывался, а нижнемеловые пласты испытаны только в скважине Ростовцевская 64. Результаты испытаний пластов ахской свиты в целом положительные и подтверждают очаг генерации нефти в разрезе скважины Ростовцевская 64. А для интенсификации притока при испытании непосредственно баженовской свиты вероятно требуются специальные работы – возможно, горизонтальный ствол и гидроразрыв пласта.

Сопоставление и обсуждение результатов исследований

Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур (табл. 4) позволяет заключить, что по классическому геофизическому критерию – критерию «невязки» – результаты только вариантов 3, 4 и 5 оптимальны (приемлемы) и равноценны. Учет «арктического» векового хода температур, неоплейстоценовой мерзлоты и ледникового покрова позволило достаточно корректно восстановить термическую историю баженовских отложений. Учет палеоклимата обуславливает увеличение расчетного палеотемпературного максимума в истории материнских отложений на площадях п-ва Ямал, на 10–13 °С.

Полученные результаты по арктическому району Западной Сибири вполне согласуются с характером ранее полученных оценок существенного влияния мезозойско-кайнозойского климата, включая резкое похолодание в конце плиоцена, на геотермический режим осадочного чехла юго-востока Западной Сибири [31].

Вариант 4, учитывающий «арктический» вековой ход температур на земной поверхности и неоплейстоценовую мерзлоту – факторы палеоклимата, оптимальный по сходимости («невязке») измеренных и расчетных геотемператур, представляет наиболее «богатую» термическую историю материнских баженовских отложений, а следовательно, обеспечивает наибольшую расчетную плотность ресурсов генерированных нефтей (табл. 5).

Учет ледникового покрова (вариант 5) мало повлиял (по отношению к варианту 4) и на величину расчетного значения плотности теплового потока из основания q , и на интенсивность и продолжительность ГФН, и на экспресс-оценку генерирован-

Таблица 5. Расчет интегрального показателя R , дающего экспресс-оценку плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей

Table 5. Calculation of the integrated indicator R giving the express assessment of density of resources of the generated Bazhenov oil

Вариант палеотемпературного моделирования Variant of paleo temperature modeling	Экспресс-расчет ресурсов (R), усл. ед. Express calculation of resources (R), cu.	Период работы палеочага млн лет назад Period of the work of the paleohearth, million years ago	Время работы палеочага, млн лет Lifetime of the paleohearth, million years	Расчетная плотность теплового потока из основания осадочного разреза, мВт/м ² Settlement density of a thermal stream from the basis of a sedimentary section, mW/m ²	Максимальные геотемпературы палеочага генерации нефти, °С Maximum geotemperatures of the paleohearth oil generation, °C
Скважина Арктическая 11/Arcticheskaya 11 well					
Вариант 1 Variant 1	52	50,4–0,0	50,4	56	119
Вариант 2 Variant 2	97	92,0–0,0	92,0	54	125
Вариант 3 Variant 3	69	85,0–3,2; 0,52–0,0	82,3	56	128
Вариант 4 Variant 4	102	92,0–0,2; 0,12–0,0	91,9	58	132
Вариант 5 Variant 5	98	89,0–0,5167; 0,070–0,0	88,6	58	130
Скважина Средне-Ямальская 14/Sredne-Yamalskaya 14 well					
Вариант 1 Variant 1	53	50,4–0,0	50,4	54	117
Вариант 2 Variant 2	77	73,0–0,0	73,0	50	117
Вариант 3 Variant 3	72	70,0–3,2	66,8	51	118
Вариант 4 Variant 4	73	70,0–3,2	66,8	51	118
Вариант 5 Variant 5	71	70,0–3,2	66,8	51	117
Скважина Ростовцевская 64/Rostovtsevskaya 64 well					
Вариант 1 Variant 1	51	50,4–0,0	50,4	49	109
Вариант 2 Variant 2	77	73,0–0,0	73,0	47	113
Вариант 3 Variant 3	77	73,0–3,2; 0,24–0,0	70,0	49	117
Вариант 4 Variant 4	76	73,0–0,5167; 0,07–0,0	72,6	50	119
Вариант 5 Variant 5	77	73,0–3,2; 0,52–0,5167; 0,04–0,0	69,8	49	116

Примечание. Коричневой заливкой показаны варианты, оптимальные (приемлемые) по критерию «невязки».

Note. The optimal variants (accepted) by «residual» criterion are showed in brown filling.

ных ресурсов УВ (табл. 5). Такой результат объясняется тем, что «возмущения» тепловой модели (температур, теплофизических свойств) в верхней части разреза «доходят» в полной мере на глубины порядка 3000 м не ранее чем через 0,2–0,3 млн лет. Такое «запаздывание» было установлено нами и ранее [19, 32]. Очевидно, что это «запаздывание» в большей степени касается влияния ледниковых покровов, возраст которых принят 0,18 млн лет.

Вместе с тем можно отметить (табл. 3), что включение в модель динамики вечномерзлых пород (возраст 0,52 млн лет) закрывает «холодное» окно геотемператур баженновской свиты в период 1,80–0,52 млн лет назад, присутствующее в *варианте 3* и обусловленное резким похолоданием на земной поверхности в этот период. Но, в свою очередь, с началом формирования вечномерзлых пород открывается «холодное» окно начиная с 0,24 млн лет назад (*вариант 4*), увеличиваясь в продолжительности при учете ледникового покрова (*вариант 5*).

Если принять во внимание полученные нами результаты, то можно констатировать несущественное влияние ледникового покрова (на землях п-ва Ямал) на термический режим материнских баженновских отложений, имеющий ключевое значение в процессах генерации УВ. Однако остается невыясненной роль ледников как фактора дополнительного давления на осадочный чехол, влияющего на генерацию и формирование залежей УВ.

В рамках принятой нами модели среды – твердое тело, горизонтальная слоистость – вполне адекватно описываются процессы теплопереноса для «плитной» осадочной толщи, при условии существенного превалирования кондуктивного механизма переноса тепла [33]. Названными условиями характеризуется Западно-Сибирская плита. Здесь магматические и гидротермальные процессы незначительны, отсутствуют или затухли 160–190 млн лет назад. Но в части механизма передачи давления для твердого тела дело обстоит не так. Дополнительно возникающее давление передается почти мгновенно, со скоростью сейсмической волны [34]. Для осадочного разреза п-ва Ямал дополнительное давление на баженновскую свиту от слоя льда мощностью 500–1500 м составит добавку от 7 до 20 %. Вместе с тем, поскольку осадочный разрез преимущественно горизонтально слоистый, каких-то аномальных (отличных от литостатического) давлений, напряжений и смещений среды в гравитационном поле не будет.

Выводы

1. Рассмотрение проблемы совершенствования технологий прогнозирования нефтегазоспособности в арктических районах Западной Сибири, выполняемого объемно-генетическим методом, показало актуальность количественной оценки и учета роли мезозойско-кайнозойского климата, в частности вечномерзлых пород и ледников в позднечетвертичное время.
2. Выделены три основных палеоклиматических фактора Севера Западной Сибири, вероятно влияющих на реконструируемый геотермический режим осадочного разреза, включая нефтематеринские отложения: *1-й фактор* – вековой ход температур на поверхности Земли; *2-й фактор* – формирование и деградация неоплейстоценовой толщи вечномерзлых пород; *3-й фактор* – позднечетвертичные ледниковые покровы.
3. Сформулирована задача дальнейших исследований роли *1-го и 2-го факторов* палеоклимата, впервые с комплексным учетом *3-го фактора*, в реконструкциях геотермического режима нефтематеринских баженновских отложений и в расчете степени реализации их генерационного потенциала.
4. Реализована методика исследований, которая основывается: 1) на палеотемпературном моделировании, наиболее полно учитывающем параметры тектоно-седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи, измеренные пластовые температуры и палеотемпературы, определенные по данным ОСВ; 2) многовариантности палеотектонических и палеотемпературных реконструкций и на анализе вариабельности результатов; 3) оценке соответствия результатов общепринятым критериям оптимальности решения обратной задачи геофизики; 4) согласованности расчетных значений плотности теплового потока с данными экспериментального определения плотности теплового потока на территории исследований.
5. На представительных мезозойско-кайнозойских разрезах месторождений п-ва Ямал (скважины Арктическая 11, Средне-Ямальская 14, Ростовцевская 64) установлено, что неучет «арктического» векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю баженновских отложений.
6. Достоверность результатов палеотемпературного моделирования уверенно контролируется сопоставлением с экспериментальными данными о тепловом потоке на территории исследований.
7. При определении ресурсов УВ объемно-генетическим методом на землях арктического региона Западной Сибири рекомендуется применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300–600 м. В случае неучета толщ вечной мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы УВ могут быть занижены до 40–50 %.
8. Полученные нами первые результаты по оценке роли позднечетвертичных ледниковых покровов (в районе п-ва Ямал) позволили отметить несущественное влияние ледникового по-

кровы на термический режим материнских баженовских отложений, имеющий ключевое значение в процессах генерации УВ.

Заключение

Объектом проведенных исследований был геотермический режим нефтематеринской баженовской свиты, которая является основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового НГК, а также возможной сланцевой формацией арктического региона Западной Сибири. Вместе с тем *представляет несомненный интерес для исследований геотермический режим китербютской свиты (J_1kt)*, являющейся источником формирования залежей УВ в ловушках нижнеюрского и, возможно, доюрского НГК. Глинистая толща китербютская, обладающая нефтематеринским потенциалом, формируется во время борельных трансгрессий в ранней юре [35].

Как уже отмечалось, *добавка к литостатическому давлению за счет ледниковых покровов может составить 7–20 %, чем, возможно, нельзя пренебрегать*. Кроме того, материал горных пород обладает диффузионной и дислокационной ползучестью [36]. При небольших глубинах преобладает диффузионная ползучесть. При такой ползучести среда ведет себя как ньютоновская несжимаемая сильно вязкая жидкость: вязкость порядка 10^{19} – 10^{21} Пуаз. В этом случае смещения точек среды могут составить несколько см/год. Учитывая скорость диффузионного смещения, «волна» аномальных диффузионных деформаций, обусловленная ледниковыми покровами, достигает глубин залегания баженовской свиты не позже, чем через 0,3 млн лет. Таким образом, *дополнительное давление ледников по механизму диффузионной ползучести вероятно и может влиять на генерацию УВ*.

Возможность выявления перерывов осадконакопления и денудации методом геотермии, как

методом, иным по физическим основам, наряду с геологическими методами и сейсморазведкой, существенно повышает достоверность знаний об истории геологического развития регионов Западной Сибири. Такая возможность особенно *актуальна* для северных районов Западно-Сибирской НГП, где по первым нашим оценкам, приведенным выше, размыты толщ палеоген-неогеновых пород достигают 400–600 м. В то время как для южного региона Западной Сибири размыты либо вообще не фиксируются, либо оцениваются в пределах 50–100 м.

Полученные первые результаты исследований по выявлению и учету параметров перерывов осадконакопления и денудаций в комплексе с уникальными палеоклиматическими характеристиками Севера Сибири (вековой ход температур на земной поверхности, динамика плиоцен-четвертичных толщ вечномерзлых пород и динамика четвертичных ледниковых покровов) позволили сделать выводы и дать первые рекомендации. А именно, как адекватно восстановить термическую историю нефтематеринских баженовских отложений, а следовательно, повысить достоверность подсчета ресурсов УВ объемно-генетическим методом.

Таким образом, на очереди стоят следующие исследования для условий арктических регионов Западной Сибири: 1) оценка роли палеоклиматических факторов реконструкции термической истории *китербютской свиты*; 2) разработка формализованных сценариев и критериев выявления и количественной оценки *параметров перерывов осадконакопления и размытов по данным геотермии*; 3) аргументированная оценка влияния роли ледников как фактора *дополнительного давления* на осадочный чехол, влияющего на генерацию и формирование залежей УВ.

Статья подготовлена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16–35–00080 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович А.Э. Проблемы реиндустриализации нефтегазового комплекса России // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 14–15.
2. Tissot B.P. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202.
3. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the Mesozoic–Cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling) / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, N.A. Malyshev, P.I. Safronov, S.A. Gusrkov, S.V. Ershov, V.A. Kazanenkov, N.S. Kim, V.A. Kontorovich, E.A. Kostyreva, V.N. Melenevsky, V.R., Livshits A.A. Polyakov, M.B. Skvortsov // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – V. 54. – № 8. – P. 1179–1226.
4. Искоркина А.А. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктического региона Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 59–73.
5. Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: an Example from the Russian Arctic / S. Nelskamp, T. Donders, J.-D. van Wess, O. Abbink // ROGTEC. – 2014. – № 18. – P. 26–35.
6. Баулин В.В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. – М.: Недра, 1985. – 176 с.
7. Глобальные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири / отв. ред. А.П. Деревянко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 511 с.
8. Палеогеография Западно-Сибирской равнины в максимум позднечетвертичного оледенения / С.А. Архипов, В.И. Астахов, И.А. Волков, В.С. Волкова, В.А. Панычев. – Новосибирск: Наука, 1980. – 103 с.
9. Томирдиаро С.В. Оледенения Арктического бассейна в плейстоцене и его связь с наземным и подземным оледенением суши // Гляциологические исследования в полярных странах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – С. 172–182.
10. Лаухин С.А., Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Современное состояние реконструкций природной среды на севере Сибири в каргинское время (поздний плейстоцен) // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2012. – Т. 87. – № 6. – С. 37–48.
11. Четвертичные оледенения Западной Сибири и других областей Северного полушария / под ред. С.А. Архипова, А.А. Величко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 201 с.
12. Артюшков Е.В. Четвертичные оледенения и трансгрессии в Западной Сибири // Изв. АН СССР, сер. геол. – 1969. – № 7. – С. 98–114.

13. Бадю Ю.Б. Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII. – № 3. – С. 11–22.
14. Районирование баженовской свиты и клиноформ неокома по плотности ресурсов сланцевой и первично-аккумулятивной нефти (на примере Нюрольской мегавпадины) / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, А.К. Мазуров, А.Н. Фомин, В.И. Старостенко // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. – № 3. – С. 29–51.
15. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кн. 9: Кайнозой Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 246 с.
16. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic / V.A. Kontorovich, S.Yu. Belyaev, A.E. Kontorovich, V.O. Krasavchikov, A.A. Kontorovich, O.I. Suprunenko // Russian Geology and Geophysics. – 2001. – V. 42. – P. 1832–1845.
17. История тектонического развития арктических районов Западно-Сибирской геосинеклизы в кайнозойское время / С.Ю. Беляев, С.А. Гуськов, В.С. Волкова, А.В. Истомин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 2. – № 1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-tektonicheskogo-razvitiya-arkticheskikh-rayonov-zapadno-sibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoy-skoe-vremya> (дата обращения 26.11.2016).
18. Volkova V.S. Geologic stages of the paleogene and neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr region (West Siberia) // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – № 4. – P. 619–633.
19. Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuro'l'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2006. – V. 47. – № 6. – P. 734–745.
20. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
21. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
22. Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20th century // Izvestiya – Physics of the Solid Earth. – 2000. – V. 36. – № 9. – P. 742–762.
23. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuro'l'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.
24. Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf // Oceanology. – 2011. – V. 51. – № 3. – P. 491–501.
25. Razvozhzaeva E.P., Kirillova G.L., Prokhorova P.N. Comparative analysis of fragments of the Mesozoic East Asian continental margin: the Kyndal (Bureya Basin, Russia) and Suibin (Sanjiang Basin, China) troughs // Russian Journal of Pacific Geology. – 2014. – V. 8. – № 6. – P. 404–422.
26. Эволюция температурного поля осадочного чехла Западно-Сибирской плиты / А.Д. Дучков, Ю.И. Галушкин, Л.В. Смирнов, Л.С. Соколова // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 51–60.
27. Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia // Russian Geology and Geophysics. – 2001. – V. 42. – № 11–12. – P. 678–689.
28. Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-аккумуляционных систем как интегрирующее начало в обосновании поисково-разведочных работ // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 101–120.
29. Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
30. Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, Б.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля. – М.: ГЕОС, 2013. – 232 с.
31. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории баженовской и тогурской свит юго-востока Западной Сибири / В.И. Исаев, А.А. Искоркина, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. – № 4. – С. 3–25.
32. Нефтегазоносность нижнемеловых резервуаров Нюрольской мегавпадины / Е.Н. Осипова, Г.А. Лобова, В.И. Исаев, В.И. Старостенко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 14–33.
33. Хуторской М.Д. Введение в геотермию. – М.: Изд-во РУДН, 1996. – 156 с.
34. Nadai A. Theory of Flow and Fracture of Solids. V. 2. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1963. – 705 p.
35. Богоявленская В.И., Полякова И.Д. Перспективы нефтегазоносности больших глубин Южно-Карского региона // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 3 (7). – С. 92–103.
36. Cserepes L., Yuen D.A., Schroeder B.A. Effect of the mid-mantle viscosity and phase-transition structure on 3D mantle convection // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2000. – V. 118. – № 1–2. – P. 125–148.

Поступила 28.11.2016 г.

Информация об авторах

Исаев В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Искоркина А.А., аспирант кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Косыгин В.Ю., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра ДВО РАН.

Лобова Г.А., доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Осипова Е.Н., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Фомин А.Н., доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 553.98(571)

INTEGRATED ASSESSMENT OF PALEOCLIMATE FACTORS OF RECONSTRUCTING THERMAL HISTORY OF PETROMATERNAL BAZHENOV SUITE IN ARCTIC REGIONS OF WESTERN SIBERIA

Valeriy I. Isaev¹,
isaevvi@tpu.ru

Albina A. Iskorkina¹,
iskorkina.a@mail.ru

Vladimir Yu. Kosygin²,
kosyginv@inbox.ru

Galina A. Lobova¹,
lobovaga@tpu.ru

Elizaveta N. Osipova¹,
osipovaen@list.ru

Aleksandr N. Fomin³,
fominan@ipgg.sbras.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Computer center of the FEB RAS,
65, Kym St. Yu Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia.

³ Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS,
3, Ac. Koptueg Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance. *The Arctic regions of Western Siberia have the unique paleoclimate features, the inversion tectonic history in Paleogene-Neogene and the considerable variations of geochemical characteristics of petromaternal deposits. This causes the necessity to improve schemes and parameters of quantitative assessment of hydrocarbon resources by volume and genetic method based on paleoreconstruction of geotemperature mode of petromaternal deposits.*

The main aim of research is to estimate the impact of paleoclimate factors – temperature secular variation of the Earth surface and Neo-Pleistocene permafrost thickness, glacial sheets, in a complex with a factor of erosive processes, on the settlement geothermal mode of petromaternal of Bazhenov suite.

Object of researches: *Bazhenov deposits of Mesozoic and Cenozoic sections, opened deep wells on Arctic, Sredne-Yamal and Rostov areas (Yamal Peninsula).*

The method of research is based on original computer paleotemperature modeling considering the parameters of sedimentation history and the history of thermal properties of sedimentary thickness, including permafrost rocks and glaciers, without aprioristic data on sizes and the nature of a deep heat flow.

Research results on identification and registration of denudation parameters in conjunction with the assessment of the role and taking into account the characteristics of paleoclimatic features allowed making the conclusions and recommendations. It is recommended to apply «Arctic» secular variation of temperature and take into account the dynamics of Neo-Pleistocene permafrost strata of about 300–600 meters when determining the hydrocarbon resources by the volumetric-genetic method in the territory of Arctic region. Calculation hydrocarbon resources may be understated by 40–50 % in case if not taking into account permafrost and paleoclimatic secular variation of temperatures. The authors have stated the tasks of forthcoming researches, including the estimate of the role of paleoclimatic factors in thermal history of Kiterbyut source formation and elaboration of formalized scenarios for identifying and estimating the interruptions in sedimentation and erosion according to the geothermic data.

Key words:

Paleoclimate, inversion tectonic, geotemperature mode, petromaternal Bazhenov deposits, Yamal Peninsula.

The paper was partially financially supported by the RFBR within the scientific project no. 16–35–00080 мол_а.

REFERENCES

1. Kontorovich A.E. Problems of reindustrialization of oil and gas complex of Russia. *Neftyanoe xozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 3, pp. 14–15. In Rus.
2. Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.
3. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Gusrkov S.A., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevskiy V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Historical-geologi-

- cal modeling of hydrocarbon generation in the Mesozoic–Cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
4. Iskorkina A.A. Paleoclimate factors of reconstruction of thermal history of the petromaternal Bazhenov shale of the Arctic region of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 59–73. In Rus.
 5. Nelskamp S., Donders T., van Wess J.-D., Abbink O. Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: an Example from the Russian Arctic. *ROGTEC*, 2014, no. 18, pp. 26–35.
 6. Baulin V.V. *Mnogoletnemerzlye porody neftegazonosnykh rayonov SSSR* [Permafrost rock of oil-and-gas regions of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 176 p.
 7. Derevyanko A.P. *Globalnye izmeneniya klimata i prirodnoy sredy pozdnego kaynozoya v Sibiri* [Global changes of climate and environment of the late Cenozoic in Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2008. 511 p.
 8. Arkhipov S.A., Astakhov V.I., Volkov I.A., Volkova V.S., Panychev V.A. *Paleogeografiya Zapadno-Sibirskoy ravniny v maksimum pozdnezhyranskogo oledeneniya* [Paleogeography of the West Siberian Plain in a maximum glaciation of the late Zyrian]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 103 p.
 9. Tomirdiario S.V. Oledeneniya Arkticheskogo basseyna v pleystocene i ego svyaz s nazemnym i podzemnym oledeneniem sushi [Freezing of the Arctic basin in a Pleistocene and its relation to the land and underground freezing of land]. *Glyatsiologicheskie issledovaniya v polyarnykh stranakh* [Glaciological research in the Polar Regions]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. pp. 172–182.
 10. Laukhin S.A., Pushkar B.S., Cherepanova M.V. Current state of reconstruction of the environment in the north of Siberia in Kargin time (late Pleistocene). *Bulletin of the Moscow society of testers of the nature. Geological department*, 2012, vol. 87, no. 6, pp. 37–48. In Rus.
 11. Arkhipova S.A., Velichko A.A. *Chetvertichnye oledeneniya Zapadnoy Sibiri i drugikh oblastey Severnogo polushariya* [Quaternary glaciation of Western Siberia and other regions of the Northern Hemisphere]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 201 p.
 12. Artyushkov E.V. Chetvertichnye oledeneniya i transgressii v Zapadnoy Sibiri [Quaternary glaciations and transgressions in Western Siberia]. *Izvestiya AN SSSR, ser. Geologiya*, 1969, no. 7, pp. 98–114.
 13. Badu Yu.B. Influence of gas-bearing structures on the capacity of Yamal cryogenic strata. *Cryosphere of Earth*, 2014, vol. XVIII, no. 3, pp. 11–22. In Rus.
 14. Isaev V.I., Lobova G.A., Mazurov A.K., Fomin A.N., Starostenko V.I. Zoning of the Bazhenov formation and clinofolds of the Neocom by density of resources of shale and primary accumulated oil (for example, Nurolrka megahollow). *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical journal*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. 29–51. In Rus.
 15. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kn. 9: Kaynozoy Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy of oil and gas bearing basins of Siberia. B. 9: The Cenozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 246 p.
 16. Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, pp. 1832–1845.
 17. Belyaev S.Yu., Guskov S.A., Volkova V.S., Istomin A.V. History of tectonic development of Arctic districts of the West Siberian geosyncline in Cenozoic. *Interesko Geo-Siberia*, 2013, vol. 2, no. 1. In Rus. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-tektonicheskogo-razvitiya-arkticheskikh-rayonov-zapadno-sibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoyское-vremya> (accessed: 26 November 2016).
 18. Volkova V.S. Geologic stages of the Paleogene and Neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr' region (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 619–633.
 19. Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuro'l'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
 20. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
 21. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity) [Model of katagenesis of organic matter (by the example of the Bazhenov formation)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
 22. Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20th century. *Izvestiya – Physics of the Solid Earth*, 2000, vol. 36, no. 9, pp. 742–762.
 23. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuro'l'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.
 24. Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 491–501.
 25. Razvozhayeva E.P., Kirillova G.L., Prokhorova P.N. Comparative analysis of fragments of the Mesozoic East Asian continental margin: the Kyndal (Bureya Basin, Russia) and Suibin (Sanjiang Basin, China) troughs. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 404–422.
 26. Duchkov A.D., Galushkin Yu.I., Smirnov L.V., Sokolova L.S. Evoliutsiya temperaturnogo polya osadochnogo chekhla Zapadno-Sibirskoy plity [Evolution of the temperature field of the sedimentary cover of the West Siberian plate]. *Russian Geology and Geophysics*, 1990, vol. 10, pp. 51–60.
 27. Kurchikov A. R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 678–689.
 28. Lopatin N.V. Concept of oil and gas generative and accumulative systems as the integrating beginning in justification of exploration. *Geoinformatika*, 2006, no. 3, pp. 101–120. In Rus.
 29. Galushkin Yu.I. *Modelirovanie osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti* [Modeling decantation basins and assessment of their petroleum potential]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 456 p.
 30. Khutorskoy M.D., Akhmedzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornyykh L.V., Poliakov B.G., Sukhikh E.A., Cybulia L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geothermic of the Arctic seas]. Ed. by Yu.G. Leonov. Moscow, GEOS Publ., 2013. 232 p.
 31. Isaev V.I., Iskorkina A.A., Lobova G.A., Fomin A.N. Paleoclimatic factors of reconstruction of thermal history of the Bazhenov and Togur suites in the southeast of Western Siberia. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical journal*, 2016, vol. 38, no. 4, pp. 3–25. In Rus.
 32. Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I. Oil and gas reservoirs of Lower Nuro'l'ka megahollow. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 14–33. In Rus.
 33. Khutorskoy M.D. *Vvedenie v geotermiyu* [Introduction into geothermic]. Moscow RUDN Publ., 1996. 156 p.
 34. Nadai A. *Theory of Flow and Fracture of Solids*. Vol. 2. New York, McGraw-Hill Book Company, 1963. 705 p.

35. Bogoyavlenskaya V.I., Polyakova I.D. Petroleum potential of the great depths of the South Kara region. *Arctic: ecology and economy*, 2012, no. 3 (7), pp. 92–103. In Rus.
36. Cserepes L., Yuen D.A., Schroeder B.A. Effect of the mid-mantle viscosity and phase-transition structure on 3D mantle convection. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2000, vol. 118, no. 1–2, pp. 125–148.

Received: 28 November 2016.

Information about the authors

Valeriy I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Iskorkina, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir Yu. Kosygin, Dr. Sc., leading researcher, Computer center of the FEB RAS.

Galina A. Lobova, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elizaveta N. Osipova, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr N. Fomin, Dr. Sc., head of the laboratory, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.

УДК 550.424

ЕСТЕСТВЕННЫЙ МИГРАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МОНГОЛО-ОХОТСКОГО ЗОЛОТОНОСНОГО ПОЯСА

Радомский Сергей Михайлович,

rsm@ascnet.ru

Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Россия, 675000, г. Благовещенск, пер. Рёлочный, 1.

В связи с возрастающим потоком рассеивания благородных металлов по водотокам с высокой скоростью речного транзита представляется актуальным разграничить техногенную и естественную миграции и определить их потенциал.

Основная цель исследования: выполнить оценку миграционного потенциала благородных металлов (Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au) Монголо-Охотского золотоносного пояса Верхнего и Среднего Приамурья по отношению окисленных и восстановленных форм компонентов биогеохимической провинции. С этой целью разработаны и опробованы методы определения окисленных $C_{\text{БМ}^{n+}}$ форм, восстановленных $C_{\text{БМ}}$ форм, их отношений $C_{\text{БМ}^{n+}}/C_{\text{БМ}}$ и оценки естественного миграционного потенциала

$$E_{\text{мигр.}} = \frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{\text{БМ}^{n+}}^a}{C_{\text{БМ}}^q}.$$

Методы, используемые в исследовании: атомная абсорбция, вольтамперометрия, фотоколориметрия, каталитрия и химического методы анализа, с использованием методик пробирного и экстракционного концентрирования при определении массовых долей благородных металлов в рядовых геохимических пробах с погрешностью по правильности, точности и воспроизводимости результата $\leq 30\%$.

Результаты. Показано, что миграция благородных металлов по речным системам с высокой скоростью транзита испытывает сильное техногенное воздействие, искажающее оценки потока миграции до 5 раз. Поэтому предложена оценка потенциала миграции по сложившемуся термодинамическому равновесию и соотношениям форм благородных металлов в биогеохимической провинции, которая также пригодна для речных систем с малой скоростью транзита. Абсолютные концентрации благородных металлов в биосфере задаются значениями стандартных окислительно-восстановительных потенциалов $E_{\text{Ox/Red}}^0$ химических соединений благородных металлов и имеют практические абсолютные интервальные значения (10 ppm – 0,001 ppb). Эти концентрации также являются равновесными, заданными термодинамическими параметрами состояния природной среды. Поэтому количество окисленных форм благородных металлов не зависит от величины их валовой концентрации в ландшафте, а определяется химической природой индивидуального благородного металла, радиуса его минерала и физико-химическими свойствами биогеохимической провинции. Для геохимической цепи почва–вода–растения–рыбы/животные отмечается увеличение значения миграционного потенциала в звене цепи. При этом: а) речной транзит не может однозначно описывать естественную миграцию благородных металлов, б) отношение окисленных и восстановленных форм благородных металлов является простым и надёжным критерием сложившегося термодинамического равновесия Приамурья, в) потенциал миграции имеет отрицательное значение для всех благородных металлов Приамурской биогеохимической провинции и сдвигает термодинамическое равновесие в область восстановительных значений.

Ключевые слова:

Биогеохимия, термодинамика, благородные металлы, Верхнее и Среднее Приамурье, миграция, потенциал миграции.

Введение

Монголо-Охотский рудный пояс окаймляет с юга докембрийскую Сибирскую платформу и Салаиро-Саянскую эпикаледонскую область, протягиваясь в субширотном направлении от юго-восточных отрогов Алтая по течению р. Амур до берегов Охотского моря на расстояние более 4000 км. В нём выделяется восточная область протяжённостью 1000 км при ширине свыше 700 км, называемая Монголо-Охотским золотоносным поясом, включающим 4 золотоносные провинции (Алданскую, Становую, Джагдинскую и Буреинскую), которые начинаются от истоков р. Амур и далее переходят за пределами Амурской области в Тихоокеанский золотоносный пояс, образуя планетарное пересечение крупнейших золотоносных поясов. Основная часть Монголо-Охотского золотоносного пояса располагается на территории Амурской области, где месторождения золота, золотоносные и платиноносные площади обособлены в 46 золотоносных и 7 потенциально платинонос-

ных рудно-россыпных узлах, занимающих 45 % территории региона [1]. Платиновая минерализация преимущественно представлена двумя ассоциациями: сперрилитовой и рутениридосминовой, представленной минералами – сперрилитом, самородной платиной, изоферроплатиной, иридосминами, осмиридами, рутениридосминами, а также лауридом, эрлихманитом, реже другими сульфидами и сульфоарсенидами. В пределах Монголо-Охотского рудного пояса при проявлении платиновой минерализации в месторождениях рудного золота и золотоносных россыпях выявлены минералы платиноидов размером от 1 до 3000 мкм. Металлы группы платины в Амурской области не добываются, поскольку их минерализация представлена сопутствующими формациями золоторудных проявлений в концентрациях ниже рудных значений [2].

В последнее время техногенная миграция золота и серебра по речным системам с высокой скоростью транзита заметно увеличилась, что связано с

возросшей интенсивностью работы золотодобывающих предприятий, приводящей к увеличению потоков рассеивания мелкодисперсных частиц [3]. Это вносит искажения в оценки процесса естественной геохимической миграции химических элементов с территории. В связи с этим представляется актуальным изучить непосредственную геохимическую миграцию группы благородных металлов, без учёта техногенной составляющей по биогеохимическим компонентам ландшафта естественных природных провинций и поверхностным водотокам затишных мест с низкой скоростью речного транзита.

Целью работы явилось определение естественных миграционных потенциалов группы благородных металлов (БМ): Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au в биогеохимических компонентах ландшафта Монголо-Охотского золотоносного пояса.

Теория вопроса

Теоретические основы метода – идеи В.И. Вернадского о связи геохимической среды обитания с процессами жизнедеятельности, взаимобменами химическими элементами и энергиями, сопровождающими эти процессы в биогеохимических цепях «материнская порода–почва–растения–фитофаги» [4]. БМ встречаются в природе редко и характеризуются низкой миграционной способностью. Миграционная способность элементов определяется как формами поступления, так и окислительно-восстановительными и кислотно-основными свойствами природных сред, их солевым составом, присутствием природных комплексобразующих веществ, процессами коагуляции и сорбции химических элементов на взвешенном веществе и донных осадках, гидродинамическими характеристиками водных систем и многими другими факторами [5]. Известно, что БМ проявляют двойственность поведения в геохимической среде. С одной стороны они проявляют склонность к рассеиванию, а с другой – к минеральному концентрированию. Склонностью к миграционному рассеиванию обладают окисленные ионизированные формы, обозначаемые $C_{БМ^{n+}}$, где $(n+)$ – степень окисления (количество отданных электронов), они характеризуются термодинамической функцией $T\Delta S$, имеющей энергетическую размерность Дж/моль. А склонность к минеральному концентрированию проявляют восстановленные формы $C_{БМ}$, характеризующиеся термодинамической функцией ΔH , также имеющей энергетическую размерность Дж/моль. Для теоретической оценки сложившегося в Приамурье равновесия между рассеиванием и концентрированием БМ требуется выполнить оценку отношения термодинамических функций $T\Delta S/\Delta H$, критерием которого на практике в первом приближении можно считать величину отношения концентраций $C_{БМ^{n+}}/C_{БМ}$ окисленных и восстановленных форм индивидуальных БМ, поэтому оценка миграции сводится к отысканию отноше-

ния $C_{БМ^{n+}}/C_{БМ}$ и подстановки найденного значения в уравнение Нернста, определяющего электрохимическую форму записи закона сохранения энергии – 2 закона термодинамики. Тогда потенциал миграции в Вольтах для простейшего случая, приведённого к одному электрону, будет равен

$$E_{\text{мигр.}} = \frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{БМ^{n+}}^a}{C_{БМ}^q}$$

где n – количество отданных электронов, a – стехиометрический коэффициент при окисленной форме БМ, q – стехиометрический коэффициент при восстановленной форме БМ.

Материалы и методы анализа

Возможность исследования геохимического поведения БМ и их роли в геохимических процессах связана с надёжным определением их следовых количеств в природных объектах. Эффективность аналитических схем при определении следовых количеств элементов определяется предварительной подготовкой, отделением от матрицы и концентрированием, что позволяет избавиться от матричного эффекта и значительно повысить соотношение сигнал/шум [6]. Эти объекты характеризуются сложным матричным составом и разнообразием химических форм. Современные прецизионные аналитические методы не позволяют в большинстве своём прямых определений БМ и требуют комбинированного подхода, сочетающего в себе следующие принципы – предварительного концентрирования, отделения от химической матрицы, растворения, концентрирования и экстракции в сочетании с выбором завершающего аналитического определения методами пламенной и электротермических атомизаций атомно-абсорбционного анализа, фотометрических, электрохимических, химических и каталитических анализов [7].

Были проанализированы образцы усреднённых биогеохимических компонентов ландшафтов Верхнего и Среднего Приамурья: грунты, почвы, вода, мох, трава укуса, кустарники, ихтиофауна, мышечная ткань диких зверей (косули) по территориально-административным районам Амурской области. Для определения количеств БМ были использованы методы пробирного микроконцентрирования при помощи сплавления на никелевый штейн и методы экстракционного атомно-абсорбционного анализа (спектрофотометры ААА «Hitachi 180–50» и «SOLAAR M-6»); инверсионного вольтамперометрического анализа (анализатор «ТомьАналит» ТА-4), а также фотометрические, каталитические и химические методы. Расхождение между результатами двух параллельных определений по правильности, точности и воспроизводимости методики не превышало 30 % [8].

Валовые содержания золота и серебра определяли после отжига проб при 600 °С в течение 1,5 часа и вскрытия аналитической навески раствором смеси кислот HCl и HNO₃ в отношении

3:1, с последующим экстракционным атомно-абсорбционным определением золота в растворе 0,05 дибутилсульфида в метилбензоле и иодидных комплексов серебра в растворе 3-метилбутанола-1 в вариантах определений: а) атомизации в пламени горелки и б) электротермической атомизации в углеродной печи [9].

Валовые содержания металлов группы платины определяли после отжига проб при 600 °С в течение 1,5 часов и последующем пробирном концентрировании БМ сульфидом никеля (II) при сплавлении в течение 25 минут при 1000 °С, далее королёк штейна отделяли от шлака, измельчали до размеров <100 мкм и растворяли при нагревании под крышками в течение 3 часов в разбавленном растворе 1:1 концентрированной HCl. Образовавшийся осадок, содержащий БМ, отделяли на фильтре «синяя лента», сушили, озоляли и сплавливали с пероксидом натрия в течение 5–7 минут при 750 °С. Остывший сплав растворяли в горячей воде и переводили в мерную колбу 0,025 дм³, откуда отбирали аликвоты на экстракции смесью 0,025М растворов

1,4-алкиланилина и ди-2-этилгексилдитиофосфорной кислоты в метилбензоле [9].

Отделение мигрирующих форм БМ ($C_{БМ^{n+}}$) от металлических ($C_{БМ}$) осуществляли нагреванием проб в стеклоуглеродных тиглях под фторопластовыми крышками 2–3М HCl до кипения с последующим охлаждением и фильтрованием через фильтр «синяя лента» с размерами пор 1–2 мкм. Фильтрат содержал мигрирующие формы металлов, а на фильтре оставались БМ в металлической форме.

Валовое содержание БМ определяли по формуле $C_{валовое}(БМ) = (C_{БМ^{n+}}) + (C_{БМ})$. В работе использовали две методики: 1) последовательное определение $C_{БМ^{n+}}$ и $C_{БМ}$ из одной навески с определением их суммы $C_{валовое}(БМ)$ и 2) определение из различных навесок $C_{валовое}(БМ)$ и с последующим определением по разности $(C_{БМ}) = C_{валовое}(БМ) - (C_{БМ^{n+}})$.

Обсуждение результатов

Монголо-Охотский пояс сложен разнообразными магматическими, метаморфическими порода-

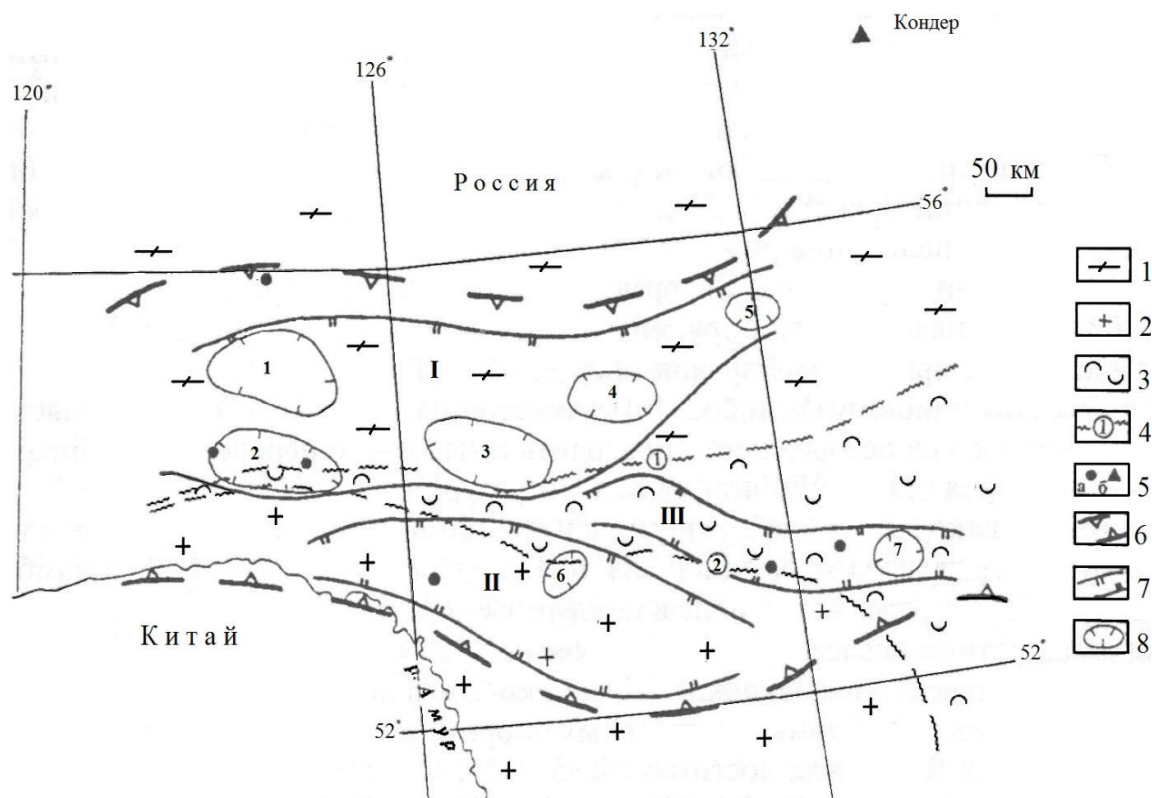


Рисунок. Схема золотоносности и платиноносности Приамурья (по В.А. Степанову, 2004): 1 – Алдано-Становой геоблок; 2 – Керулено-Аргуно-Мамынский срединный массив; 3 – Амуро-Охотская геосинклиально-складчатая система; 4 – границы геоблоков, представленные глубинными разломами: Монголо-Охотским и Южно-Тукурингским; 5 – основные месторождения золота (а) и платины (б); 6 – граница Приамурской ветви Алтае-Амурского платиноносного пояса; 7 – границы платиноносных металлогенических зон; 8 – границы потенциальных платиноносных рудно-россыпных узлов

Figure. Map of gold and platinum content in Amur region (by V.A. Stepanov, 2004): 1 is the Aldano-Stanovoy geoblock; 2 is the Keruleno-Arguno-Mamynsky median mass; 3 is the Amur-Okhotsk geosynclinal-fold system; 4 is the border of geoblocks introduced by deep fractures: Mongol-Okhotsk and Uzhno-Tukuringrskim; 5 is the major gold deposits (a) and platinum (b); 6 is the border of Amur branch of Altay-Amur platinum-bearing belt; 7 is the border of platinum metallogenic zones; 8 is the border of potential platinum ore-placer sites

ми общей мощностью до 10 км, которые сильно дислоцированы, перемяты, разорваны и имеют возраст образования докембрий и палеозой. Осадочные породы представлены мезозойскими отложениями, а обломочные породы и торфяники характеризуют кайнозойские маломощные отложения.

Верхнее и Среднее Приамурье – это регион восточной Азии, уникальный своим структурно-тектоническим положением, находится в пределах Монголо-Охотской ветви Тихоокеанского рудного пояса. Месторождения золота, золотоносные и платиноносные площади располагаются в пределах орогенных областей, а также вдоль периферии Амуро-Зейской равнины, охватывая разновысотные ландшафты (рисунок).

Общая добыча золота в Амурской области с 1867 по 2010 гг. составила 922 т и только 123 т приходится на рудное золото, в то время как перспективы территории по рудному и россыпному золоту оцениваются по геохимическим данным в 6200 т [10]. Соотношение между месторождениями золота коренного и россыпного типов составляло 0,7/1 для разведанных запасов [1], а вследствие добычи золота в основном из россыпных месторождений изменилось до 10/1 по оценкам различных исследователей и привело к сокращению сроков прогнозной эксплуатации россыпей до 10–30 лет. Впервые масштабы техногенной миграции золота в Приамурье оценил О.Е. Звягинцев в 1941 г. Он указал на перенос золота в р. Амур и вынос его в море в количестве 8,5 т в год [11]. Современное состояние миграции было оценено автором в 2010 г. Установлено, что миграция золота и серебра осуществляется с территории Амурской области за 5–7 дней по поверхностным водотокам речных систем с высокой скоростью транзита. Коллектором стока БМ является река Амур. Через поперечный створ водного потока в черте г. Благовещенска ежегодно выносятся водами рек Амуром и Зеей золота и серебра соответственно: р. Амур 5,3 и 1,1 т; р. Зeya 16,1 и 3,0 т; при общем суммарном выносе в Средний Амур 21,4 и 4,1 т [12]. Существует проблема оценки масштабов техногенной миграции БМ, и в частности золота, водными системами, в связи с использованием технологий гравитационного обогащения, где преобладающими способами добычи россыпного золота, имевшего размер частиц 0,5–5000 мкм в 50 % случаев приходилось на фракцию размерности 100–200 мкм. При этом добывались в основном частицы размерности ≥ 100 мкм, тогда как тонкое, пылевидное и мелкодисперсное золото рассеивалось в окружающем пространстве и далее появлялось в различных природных объектах, нередко находящимся на значительном удалении от разрабатываемого ареала, что приводило к увеличению уровней концентраций БМ в фоновых компонентах природных ландшафтов в 4,8 раза, вследствие разработки месторождений полезных ископаемых [8].

Кларки БМ в земной коре представлены данными [13] и размещены в табл. 1, характеризующей их уровни в биогеохимических компонентах Верхнего и Среднего Приамурья. Биогеохимические компоненты являются звеньями геохимической цепи: горные породы–почвы–вода–растения–рыбы/животные. Почва является крайним звеном земной коры и базовым элементом для биогеохимических компонентов природной среды. Давление концентраций БМ в звеньях цепи передаётся пропорционально коэффициентам переноса, тождественным в первом приближении коэффициентам биологического поглощения (КБП). В почвах Приамурья средние значения концентраций БМ превышают их значения в земной коре, кроме Ag, что является характерной особенностью региона [1]. Исследуемый ареал имеет площадь 363,7 тыс. км² и содержит месторождения золота россыпного и коренного типов, приуроченные к разломам древнего заложения, разделяющим структурные элементы земной коры. По климатическим условиям относится к районам с проявлениями многолетней и сезонной мерзлоты [14].

Вода является элементом связи между звеньями геохимической цепи. Гидрографическая сеть биогеохимической провинции развита хорошо и представлена мелкими реками, озёрами и болотами. Заболоченные почвы территории Верхнего и Среднего Приамурья, ограниченной рамками Амурской области, занимают 13,6 % общей площади, формируются под сфагновыми мхами и частично осоками, а в зоне хвойно-широколиственных лесов – из различных трав. Часто торф присутствует в отвалах вскрышных пород, образующихся при эксплуатации месторождений БМ, в которых отмечаются их повышенные концентрации до значений десятков ppm, так как он является хорошим сорбентом [15].

Растения являются основным элементом биосферы и поглощают из земной коры различные химические элементы вместе с питающими их почвенными растворами, содержащими БМ и концентрирующими их в течение жизненного периода. Концентрации БМ в растениях Приамурья уступают аналогичным показателям для растений Южной Африки [16] в среднем в 2 раза и для растений Центральной Африки – в 2–4 раза [17]. Разницу в наблюдаемых концентрациях БМ можно объяснить воздействием климатического фактора, главным действующим элементом которого является средняя температура, характеризующая зоны сезонной мерзлоты, умеренных широт и экваториального пояса соответственно.

Поглощение БМ живыми объектами является барьерным и осуществляется только для их окисленных форм. На месторождениях БМ их концентрации могут достигать значений первых десятков ppm в базовой основе трофических цепей – почвах, что приводит к возрастанию концентраций БМ и в последующих звеньях геохимической цепи [8]. Од-

нако это не приводит к изменению отношений окисленных и восстановленных форм БМ для биогеохимических компонентов ландшафта в связи с тем, что термодинамические параметры равновесия обусловлены физико-химическими параметрами состояния среды. Данные отношения лишь незначительно возрастают при изменении качественного статуса геохимических цепей (табл. 2).

Таблица 1. Уровни фоновых концентраций БМ в биогеохимических компонентах ландшафта Верхнего и Среднего Приамурья (на сухое вещество), в ppb (*m* – число проб)

Table 1. Levels of noble metal background concentrations in biogeochemical components of landscape in Upper and Middle Amur region (on a dry matter basis), in ppb (*m* is the number of samples)

Проба Sample	Ru	Rh	Pd	Ag	Os	Ir	Pt	Au
Земная кора Earth's crust [13]	0,1	0,06	0,4	70	0,05	0,05	0,4	2,5
Вода/Water, <i>m</i> =32	0,002	0,001	0,001	0,015	0,003	0,002	0,002	0,02
Почвы/Soil, <i>m</i> =74	4	2	1	41	3	4	5	25
Укос трав Mowing, <i>m</i> =107	0,2	1	2	4	3	5	7	9
Торф фона Peat back- ground, <i>m</i> =23	3	2	1	80	2	7	5	24
Рыбы/Fish, <i>m</i> =15	0,8	0,4	1,0	0,05	0,7	0,8	0,9	1,0
Животные Animals, <i>m</i> =12	0,3	0,2	0,3	0,9	0,5	0,5	0,85	1,1

Таблица 2. Отношения $C_{БМ^{n+}}/C_{БМ}$ окисленных и восстановленных форм благородных металлов в природных объектах Верхнего и Среднего Приамурья (*m* – число проб)

Table 2. Relationship $C_{NM^{n+}}/C_{NM}$ between oxidized and reduced forms of noble metals in the natural objects in Upper and Middle Amur region (*m* is the number of samples)

Проба Sample	Ru	Rh	Pd	Ag	Os	Ir	Pt	Au
Вода/Water, <i>m</i> =22	0,004	0,001	0,001	0,01	0,005	0,003	0,004	0,02
Почвы/Soil, <i>m</i> =48	0,001	0,001	0,001	0,02	0,003	0,003	0,005	0,01
Растения Plants, <i>m</i> =25	0,01	0,005	0,007	0,07	0,015	0,012	0,06	0,15
Рыбы/Fish, <i>m</i> =25	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,09	0,19
Животные Animals, <i>m</i> =31	0,04	0,02	0,01	0,04	0,02	0,03	0,08	0,18

Для БМ биогеохимических компонентов Приамурья значение отношений $C_{БМ^{n+}}/C_{БМ} < 0,2$ (табл. 2), что свидетельствует о преобладании процессов восстановления и минерального концентрирования над процессами окисления, рассеивания и миграции.

Окисление минералов БМ в зоне гипергенеза осуществляется кислородом в мягких условиях, приближающихся к термодинамически стандартным при определённом участии органического вещества. Для биосферы отмечается сезонность в процессе окисления: ускорение в летний период и затухание в зимний период, вследствие изменения температур. Окисленные формы стабилизируются во времени комплексным состоянием вещества. Максимальной устойчивостью характеризуются комплексные соединения БМ с органическими лигандами. Окисленные формы БМ высокотоксичны для живых организмов, тогда как металлические формы для них индифферентны [18]. С одной стороны БМ мало распространены в природе и относятся к группе ультра микроэлементов, с другой, их соединения – опасные токсиканты для живых организмов с высокой физиологической активностью. Физиологически опасным следует считать длительное воздействие концентраций на организм порядка единиц ppb, но в реальности в ландшафтах Приамурья абсолютные значения достигают лишь сотых долей ppb для мягких тканей организмов и жидких биосред. Серебро является сильным ферментным токсикантом и при высоких его концентрациях в почве у растений в определённый момент наступает порог поглощения (5 ppb) из-за нарушения проницаемости клеточных мембран и гибель [19]. В практике золотодобычи Приамурья отмечаются явления отсутствия образования травяного покрова на вскрышных отвалах рудных тел в течение 100 лет и отсутствие поросли деревьев в течение 25–30 лет. Что, по-видимому, является одной из причин суммарного десятикратного превышения порога фитотоксичности окисленных форм БМ в торфе, который находится во вскрышных породах месторождений.

Анализ термодинамических констант БМ показал преимущественную энергетическую выгодность самородного минерального состояния в природных геохимических системах для них по сравнению со всеми прочими. При этом наиболее благоприятно электронейтральное состояние для Pt, Rh, Ru, Os, Ir, затем идёт Pd, к которому приближаются Au и Ag. Из окисленных форм БМ наиболее распространёнными и относительно стабильными в природе являются ионы обладающие валентностью, приведённой в скобках Ru (IV, V), Rh (III), Pd (II), Ag (I), Os (IV, VI), Ir (III), Pt (II), Au (I, III), устойчивость которых определяется потенциалом ионизации [20].

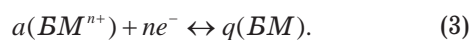
Взаимодействие окружающей среды с минералами БМ осуществляется по границе раздела фаз

на поверхности их зёрен и заключается в окислительной деструкции частиц. БМ включаются в биогеохимический круговорот вещества и энергии в пространстве и времени, который имеет цикличность в своём проявлении. Наибольшую степень вовлечения в процесс круговорота имеют минеральные ассоциации БМ россыпного типа, находящиеся в биосфере на границе раздела твёрдой, жидкой и газообразной фаз. Кристаллы БМ месторождений коренного типа находятся внутри вмещающих пород, в окружении плотного кольца атомов силикатной или железо-сульфидной матрицы и поэтому мало взаимодействуют с атмосферой, гидросферой и биосферой. Для них включение в круговорот становится возможным лишь при разрушении «матрицы» в процессе эрозии. Окисленные миграционные формы БМ, находящиеся в стационарной открытой термодинамической системе как на поверхности кристалла, так и вне её, обладают повышенными запасами энергии по сравнению с восстановленными атомами БМ, находящимися внутри кристалла. Сильную корреляционную связь окислительно-восстановительных, термодинамических и геометрических размеров минералов БМ предложено оценивать отношением $3/r_{cp} = 3m\sum 1/r_i$; где $r_{cp} = \sum r_i/m$ – средний радиус минералов в мкм; r_i – радиус i минерала; m – количество минералов в первом приближении уравнения (1) [21]:

$$C_{BM^{n+}} / C_{BM} \approx T\Delta S / \Delta H \approx 3/r_{cp} \approx 3m \sum 1/r_i. \quad (1)$$

Как правило, на практике невозможно оценить суммарные геометрические и термодинамические параметры минералов БМ, а оценочное отношение концентраций $C_{BM^{n+}}/C_{BM}$ получить довольно легко для каждого компонента биогеохимического ландшафта биосферы. Экспериментальная оценка миграционного потенциала (второго слагаемого уравнения 2) для объектов исследования Приамурья была получена и представлена в табл. 3, на основании решения упрощённого уравнения Нернста, приведённого к одному электрону, для процесса восстановления описываемого уравнением (3), где ne^- – количество присоединяемых электронов; a – стехиометрический коэффициент окисленной формы БМ; q – стехиометрический коэффициент восстановленной формы БМ [22]:

$$E_{BM^{n+}/BM} = E_{BM^{n+}/BM}^\circ + \frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{BM^{n+}}^a}{C_{BM}^q}, \quad (2)$$



Параметрические решения уравнения (2) для почво-грунтов геохимических цепей Приамурья представлены в табл. 3.

Для всех БМ миграционный потенциал имеет отрицательное значение и сдвигает термодинамическое равновесие в восстановительную область. На наш взгляд это обусловлено действием молекулярного водорода, который образуется в процессе анаэробного распада органических веществ в анаэробных участках почвы [23] и естественными природными причинами, связанными с процессами выделения водорода при дегазации земной коры по местам геотектонических разломов земной коры, которыми являются русла рек [24]. Эти выделения $\uparrow H_2$ определяют динамику быстро меняющихся свойств почвы: окислительно-восстановительного потенциала, содержания подвижных форм питательных элементов, численности и активности почвенных микроорганизмов, состава почвенных растворов, которые, в свою очередь, влияют на значения термодинамических характеристик биогеохимической провинции.

Поверхностные воды рек принадлежат к термодинамически нестабильному водному объекту, существующему в следующих интервалах рН (5,00–8,10); Eh – (0,22–0,15) В. Зона существования данной категории природных вод на диаграмме Пурбэ смещена к нижней водородной границе области существования воды [25], что наряду с естественными причинами имеет и техногенные, связанные с активностью горнодобывающей (Амурская область занимает 2 место в России по золотодобыче) и строительной промышленности, при работе которых извлекаются из недр земли подстилающие горные породы, содержащие в качестве примесей сульфиды металлов, при взаимодействии с водой из последних также выделяется газообразный водород [26]. Прямые измерения концентрации водорода в воде не были выполнены из-за большой сложности определения таких концентраций. Направление транзита водорода направлено из земной коры в атмосферу, и его восходящий поток пре-

Таблица 3. Параметрические данные решения уравнения Нернста наиболее распространённых и устойчивых электродных пар благородных металлов для почво-грунтов Верхнего и Среднего Приамурья, приведённых к одному электрону

Table 3. Parametric data for solving the Nernst equation of the most common and stable electrode pairs of noble metals for soils in Upper and Middle Amur regions, cast to one electron

Компонент/Component	Ru ²⁺ /Ru	Rh ³⁺ /Rh	Pd ²⁺ /Pd	Ag ⁺ /Ag	Os ²⁺ /Os	Ir ³⁺ /Ir	Pt ²⁺ /Pt	Au ⁺ /Au
$C_{BM^{n+}}/C_{BM}$	0,001	0,001	0,001	0,02	0,003	0,003	0,005	0,01
$E_{BM^{n+}/BM}^\circ$	0,45	0,8	0,915	0,799	0,85	1,15	1,2	1,68
$E_{BM^{n+}/BM}$	0,361	0,741	0,826	0,699	0,776	1,10	1,132	1,562
$\frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{BM^{n+}}^a}{C_{BM}^q}$	-0,089	-0,059	-0,089	-0,100	-0,074	-0,05	-0,068	-0,118

восходит встречный нисходящий поток кислорода, направленный в воду из атмосферы, встречающий большое сопротивление водной и минеральной горной среды, ограничивающей проникновение кислорода в земную кору 150–300 метрами. Концентрации растворённого кислорода в поверхностных водах рек 8–11 мг/дм³ поддерживают процесс окисления и существования миграционных форм БМ. Для застойных, заболоченных поверхностных вод с малой скоростью транзита основной миграционной составляющей в биогеохимическом ландшафте является окисленная форма БМ, поскольку снижение скорости потока нивелирует техногенную составляющую миграции.

Заключение

Абсолютные концентрации БМ в биосфере задаются значениями стандартных окислительно-восстановительных потенциалов $E_{Ox/Red}^{\circ}$, где Ox/Red – выбранная окислительно-восстановительная пара [22] химических соединений БМ, и имеют практические абсолютные интервальные значения 10^{-5} – 10^{-12} (10 *ppm* – 0,001 *ppb*). Эти концентрации также являются равновесными, определяющимися термодинамическими параметрами состояния природной системы. В геохимической цепи: горные породы–почва–вода–растения–рыбы/животные отмечается абсолютное увеличение значения миграционного потенциала по ее звеньям. Количественные значения потенциала ми-

грации БМ для последующих звеньев геохимической цепи – растений, рыб и животных – могут быть получены путём подстановки соответствующих значений (табл. 2) в уравнение Нернста (2). В живых организмах фиксируются повышенные значения окисленных форм БМ, статистически значимо превосходящие расчётные соотношения, представленные в данных работы [18]. Поэтому количество окисленных форм БМ в геохимической провинции Приамурья не зависит от величины их валовой концентрации в ландшафте, а определяется химической природой индивидуального БМ, радиуса его минерала и физико-химическими свойствами природной среды.

Выводы

1. Естественную миграцию невозможно описать, используя только параметры речного транзита БМ.
2. Соотношение окисленных и восстановленных форм БМ является простым и надёжным критерием оценки сложившегося термодинамического равновесия в базовых и последующих звеньях геохимической цепи Приамурья.
3. Потенциал миграции имеет отрицательное значение для всех БМ Приамурской биогеохимической провинции, в результате электрохимического равновесия, описываемое уравнением Нернста, смещается в направлении усиления процесса восстановления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения Востока России. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 352 с.
2. Платиноносность Дальнего Востока / В.Г. Моисеенко, В.А. Степанов, А.В. Эйриш, А.В. Мельников. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 176 с.
3. Gold and silver in a system of sulfide tailings. P. 1: Migration in water flow / I.N. Myagkaya, E.V. Lazareva, M.A. Gustavtis, S.M. Zhmodik // Journal of Geochemical Exploration. – 2016. – V. 160. – P. 16–30.
4. Подлипский И.И. Зооиндикация в эколого-геологической оценке состояния грунтов селитебных территорий // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2016. – № 1. – С. 69–80.
5. Платиновые металлы в окружающей среде: содержание, определение, поведение в природных системах / И.В. Кубракова, А.В. Никулин, И.Я. Кошечева, О.А. Тютюнник // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – № 6. – С. 645–656.
6. Analysis of palladium concentrations in airborne particulate matter with reductive co-precipitation, He collision gas, and ID-ICP-Q-MS / H. Alsenz, F. Zereini, C.L.S. Wiseman, W. Püttmann // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2009. – V. 395. – № 6. – P. 1919–1927.
7. Balcerzak M. Methods for the Determination of Platinum Group Elements in Environmental and Biological Materials // Critical reviews in analytical chemistry. – 2011. – V. 41. – Iss. 3. – P. 214–235.
8. Благородные металлы в ландшафтах Амуро-Зейской равнины Приамурья / С.М. Радомский, В.И. Радомская, Н.В. Моисеенко, В.Г. Моисеенко // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 422. – № 5. – С. 665–667.
9. Радомский С.М., Радомская В.И. Баланс форм благородных металлов на золоторудном месторождении Покровское (Верхнее Приамурье) // Георесурсы. – 2015. – Т. 1. – № 4 (63). – С. 85–89.
10. Степанов В.А. Перспективы золотого оруденения Приамурской провинции // Вестник Амурского государственного университета. – 2011. – № 55. – С. 77–86.
11. Звягинцев О.Е. Геохимия золота. – М.; Л.: АН СССР, 1941. – 121 с.
12. Радомский С.М., Радомская В.И. Особенности геохимического поведения золота и серебра в поверхностных водах Верхнего Приамурья // Естественные и технические науки. – 2010. – № 2. – С. 249–254.
13. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – № 2. – P. 1217–1232.
14. Амурская область. Опыт энциклопедического словаря / под ред. В.В. Воробьёва, А.П. Деревянко, ред.-сост. Н.К. Шульман. – Благовещенск: Амурское отд. Хабаровского кн. изд-ва, 1989. – 416 с.
15. Interactions of peat and its components with gold and palladium ions in aqueous solutions / V.I. Radomskaia, L.M. Pavlova, L.P. Noskova, V.V. Ivanov, A.V. Poselyuzhnaya // Solid Fuel Chemistry. – 2015. – Т. 49. – № 3. – P. 156–166.
16. Rauch S., Fatoki O.S. Antropogenic platinum enrichment in the vicinity of mines in the Bushveld igneous complex, South Africa // Water Air Soil Pollut. – 2013. – № 11. – 224:1395.
17. Essumang D.K., Adokoh C.K., Boamponsem L. Levels of platinum group metals in selected speies (Sarotherodon melanothron, Chonophorus lateristriga, Macrobrachium vollenhovenil and Crassostrea tulipa) in some estuaries and lagoons along the coast

- of Gana // The Scientific World Journal. – 2010. – № 10. – P. 1971–1987.
18. Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.Е. Мирошников и др. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
19. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. 3rd ed. – London; New York: CRC Press, 2001. – 403 p.
20. Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах – М.: Наука, 1983. – 287 с.
21. Radomskiy S.M., Radomskaya V.I Ratio oxidized and reduced forms of noble metals in the Amur River basin // Tyumen State University Herald. – 2012. – № 12. – P. 44–48.
22. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. – М.: Химия, 1989. – 448 с.
23. Klishin V.I., Patrakov Yu.F., Mandrov G.A. Integrated processing of brown coal and coal sludge (short communication) // Solid Fuel Chemistry. – 2013. – Т. 47. – № 5. – P. 303–305.
24. Changes in the humus status and the structure of the microbial biomass in hydrogen exhalation places / N.I. Sukhanova, S.Y. Trofimov, L.M. Polyanskaya, N.V. Larin, V.N. Larin // Eurasian Soil Science. – 2013. – V. 46. – № 2. – P. 135–144.
25. Garrels R.M., Christ C.L. Solutions, Minerals and Equilibria. – New York: Harper & Row, 1965. – 450 p.
26. Gold and silver in a system of sulfide tailings. P. 2: Precipitation on natural peat / I.N. Myagkaya, E.V. Lazareva, M.A. Gustavtis, S.M. Zhmodik // Journal of Geochemical Exploration. – 2016. – V. 165. – P. 8–22.

Поступила 09.12.2016 г.

Информация об авторах

Радомский С.М., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории рудогенеза Института геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук.

UDC 550.424

NATURAL MIGRATION POTENTIAL OF NOBLE METALS OF MONGOL–OKHOTSK GOLD BELT

Sergey M. Radomskiy,

rsm@ascnet.ru

Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
1, Roelochny Lane, Blagoveshchensk, 675000, Russia.

In connection with increasing flow of noble metals dispersion in river waterways at high transit speed, it seems relevant to distinguish between man-made and natural migration and determine its potential.

The main aim of the study is to assess noble metals (Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au) migration potential of Mongol-Okhotsk gold belt in relation to oxidized and reduced forms of biogeochemical components in the Upper and Middle Amur region province. To this effect, the author has developed and tested the methods for determining the oxidized $C_{NM^{n+}}$ forms, reduced C_{NM} forms, their relations $C_{NM^{n+}}/C_{NM}$,

and evaluating the natural migration potential $E_{migr.} = \frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{NM^{n+}}^a}{C_{NM}^q}$.

The methods used in the study: atomic absorption, electrochemistry, photometry, catalysis and chemical analysis methods, using techniques of extraction and assay concentration in determining the mass of ordinary shares in noble metal geochemical samples with an error for the correctness, accuracy and reproducibility of $\leq 30\%$.

The results. It is shown that the migration of noble metal on river systems with high transit speed is subjected to strong technological impact, distorting the flow of migration assessment up to 5 times. Therefore the author proposed the assessment of migration potential for thermodynamic equilibrium and established relations in the form of noble metal biogeochemical province, which is also suitable for river systems with low transit speeds. Noble metal absolute concentrations in biosphere are set by the value of standard $E_{Ox/Red}^0$ potentials, noble metal chemical compounds and have practically absolute interval values (10 ppm – 0,001 ppb). These concentrations are also equilibrium, given by thermodynamic parameters of the natural environment. Therefore, the amount of noble metal oxidized form does not depend on size of their gross concentration in landscape, but it is determined by chemical nature of the individual noble metal, radius of its mineral and physicochemical properties of biogeochemical province. For the geochemistry chain soil–water–plant–fish/animal the value of migration potential in the chain link increases. In this case: a) river transit does not uniquely describe the natural migration of noble metals, b) the ratio of oxidized and reduced forms of noble metals is a simple and reliable criterion of existing thermodynamic equilibrium of the Amur region, c) the potential of migration is negative for all noble metals of Amur biogeochemical province and shifts thermodynamic equilibrium to recovery values.

Key words:

Biogeochemistry, thermodynamics, noble metals, the Upper and Middle Amur region, migration, migration potential.

REFERENCES

- Moiseenko V.G., Eirish L.V. *Zolotorudnye mestorozhdeniya Vostoka Rosii* [Gold-ore deposits of the Russian Far East]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1996. 352 p.
- Moiseenko V.G., Stepanov V.A., Eirish L.V., Melnikov A.V. *Platinosnost Dalnego Vostoka* [Platinum Far East]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2004. 176 p.
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustavtis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, vol. 160, pp. 16–30.
- Podlipskii I.I. Zooindication (lumbricina family) in ecological and geological assessment of the soil state in residential areas. *Environmental Geoscience*, 2016, vol. 160, pp. 16–30. In Rus.
- Kubrakova I.N., Nikulin A.V., Koshceeva I.Ya., Tyutyunnikova O.A. Platinum Metals in the Environment: Content, Determination, Behaviour in Natural Systems. *Chemistry for Sustainable Development*, 2012, vol. 20, no. 6, pp. 645–656. In Rus.
- Alsenz H., Zereini F., Wiseman C.L.S., Püttmann W. Analysis of palladium concentrations in airborne particulate matter with reductive co-precipitation, He collision gas, and ID-ICP-Q-MS. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, vol. 395, no. 6, pp. 1919–1927.
- Balcerzak M. Methods for the Determination of Platinum Group Elements in Environmental and Biological Materials. *Critical reviews in analytical chemistry*, 2011, vol. 41, Iss. 3, pp. 214–235.
- Radomskii S.M., Radomskaya V.I., Moiseenko N.V., Moiseenko V.G. Noble metals in landscapes of the Amur-Zeya plain in Priamurye. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 423, no. 1, pp. 1250–1252.
- Radomskii S.M., Radomskaya V.I. Balance of noble metals forms in Pokrovkas Gold Layer gold layer Pokrovskoe (Upper Amur region). *Georesources*, 2015, vol. 1, no. 4 (63), pp. 85–89. In Rus.
- Stepanov V.A. Prospects for gold mineralization in Amur province. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 55, pp. 77–86. In Rus.
- Zvyagintsev O.E. *Geokhimiya zolota* [Gold geochemistry]. Moscow; Leningrad, AN USSR, 1941. 121 p.
- Radomskii S.M., Radomskaya V.I. Features of gold and silver geochemical behavior in surface waters of the Upper Amur region. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 2, pp. 249–252. In Rus.
- Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 2, pp. 1217–1232.
- Amurskaya oblast. Opyt entsiklopedicheskogo slovarya* [Amur region. Experience encyclopedia]. Eds. V.V. Vorobev, A.P. Derevyanko, N.K. Shulman. Blagoveshchensk, Amurskoe otd. Khabarovskogo kn. iz-va, 1989. 416 p.
- Radomskaya V.I., Pavlova L.M., Noskova L.P., Ivanov V.V., Poselyuzhnaya A.V. Interactions of peat and its components with gold and palladium ions in aqueous solutions. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, no. 3, pp. 156–166.
- Rauch S., Fatoki O.S. Antropogenic platinum enrichment in the vicinity of mines in the Bushveld igneous complex, South Africa. *Water Air Soil Pollut*, Springer, 2013, no. 11, 224:1395.
- Essumang D.K., Adokoh C.K., Boamponsem L. Levels of platinum group metals in selected speies (Sarotherodon melanotheron,

- Chonophorus lateristriga, Macrobrachium vollenhovenii and Crassostrea tulipa) in some estuaries and lagoons along the coast of Gana. *The Scientific World Journal*, 2010, no. 10, pp. 1971–1987.
18. Voitkevich G.V., Kokin A.V., Mirosnikov A.E. *Spravochnik po geokhimii* [Handbook of Geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 480 p.
 19. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace elements in soils and plants*. 3rd ed. London, New York, CRC Press Publ., 2001. 403 p.
 20. Novgorodova M.I. *Samodnyye metally v gidrotermalnykh rudakh* [Native metals in hydrothermal ores]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 287 p.
 21. Radomskiy S.M., Radomskaya V.I. Ratio oxidized and reduced forms of noble metals in the Amur River basin. *Tyumen State University Herald*, 2012, no. 12, pp. 44–48.
 22. Lyre Yu.Yu. *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Handbook of Analytical Chemistry]. Moscow, Khimia Publ., 1989. 448 p.
 23. Klishin V.I., Patrakov Yu.F., Mandrov G.A. Integrated processing of brown coal and coal sludge (short communication). *Solid Fuel Chemistry*, 2013, vol. 47, no. 5, pp. 303–305.
 24. Sukhanova N.I., Trofimov S.Y., Polyanskaya L.M., Larin N.V., Larin V.N. Changes in the humus status and the structure of the microbial biomass in hydrogen exhalation places. *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46, no. 2, pp. 135–144.
 25. Garrels R.M., Christ C.L. *Solutions, Minerals and Equilibria*. New York, Harper & Row Publ. 1965. 450 p.
 26. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustavtis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, vol. 165, pp. 8–22.

Received: 5 December 2016.

Information about the authors

Sergey M. Radomskiy, Cand. Sc., researcher, Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 556.314

ОСНОВНОЙ СОЛЕВОЙ СОСТАВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕК ЮЖНОГО ПРИМОРЬЯ

Вах Елена Александровна^{1,2},
Adasea@mail.ru

Павлова Галина Юрьевна²,
pavlova@poi.dvo.ru

Михайлик Татьяна Александровна²,
tatyana_libra@mail.ru

Тищенко Павел Яковлевич²,
tpavel@poi.dvo.ru

Семкин Павел Юрьевич²,
Pahno@list.ru

¹ Дальневосточный федеральный университет,
Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

Актуальность работы. Редкоземельные элементы (РЗЭ) и параметры общего солевого состава (ОСС) являются индикаторами экологического состояния речных вод и могут применяться в системе мониторинга за водными объектами.

Цель работы: комплексное исследование РЗЭ и параметров ОСС для выявления антропогенной нагрузки на бассейны рек юга Приморья.

Методы исследований. Концентрации макро ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) были измерены методом ионно-обменной хроматографии (Shimadzu LC-20A), РЗЭ – масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (Thermo Finnigan Element 2). рН измеряли потенциометрическим методом, общую щелочность анализировали прямым титрованием по методу Бруевича, общая минерализация речной воды (Σn) определялась как сумма вкладов макро ионов.

Результаты. Сезонные гидрохимические исследования основного солевого состава рек южного Приморья показали, что речные воды ультрапресные, среднегодовые значения Σn не превышали 100–150 мг/л. Обнаружено значительное увеличение доли сульфат-ионов в реках: Кневичанке, Раздольной и Артемовке, в период весеннего половодья, что связано со сжиганием топлива в зимний сезон, бытовыми и канализационными стоками. Региональный уровень суммарных концентраций растворенных форм редкоземельных элементов в изученных пресных поверхностных водах изменяется от 0,16 до 2,72 мкг/л. Интервал колебаний содержания РЗЭ в водах отдельных рек составляет от 0,20 до 0,56 мкг/л. Повышенные содержания растворенных редкоземельных элементов и растворенных солей в поверхностных водах рек Раздольной, Артемовки, Кневичанки и Шкотовки определяется антропогенной нагрузкой на бассейны этих рек.

Ключевые слова:

Река, редкоземельные элементы, основной солевой состав, гидрохимия, Южное Приморье.

Введение

Реки, как наиболее подвижная часть гидросферы, очень восприимчивы к внешним условиям: составу геологических пород на водосборе, климатическим и погодным изменениям, биологическим процессам, антропогенному воздействию. Исследования основного солевого состава (ОСС) с целью выяснения механизмов формирования химического состава речных вод широко обсуждаются в литературе [1–6]. Реки Приморского края являются уникальным объектом исследований в экологическом отношении, поскольку они имеют низкую способность к самоочищению из-за особенностей гидрологического режима и малой протяженности [7]. Сезонные гидрохимические исследования в некоторых реках Приморья показали, что параметры ОСС позволяют оценить вклад структурно-

ландшафтных особенностей и антропогенной нагрузки в изменчивость химического состава речной воды [8–11].

Интерес к исследованию редкоземельных элементов (РЗЭ) в водах связан с тем фактом, что профиль распределения РЗЭ в воде в целом повторяет профиль распределения этих элементов в водовмещающих породах [12], т. е. РЗЭ могут быть использованы для выяснения процессов происхождения и эволюции вод [13, 14]. Кроме того, в последние годы появились работы по изучению редкоземельных элементов как одного из новых и малоизученных химических загрязнителей окружающей среды [15–19]. Редкоземельные элементы обладают токсичными свойствами и отрицательно влияют на здоровье человека [20]. В отечественной практике установлено ПДК для питьевой воды только для

Eu (0,3 мг/л) и Sm (0,024 мг/л) [20]. Основными источниками антропогенного загрязнения поверхностных водотоков редкоземельными элементами являются фосфорные удобрения, золоотвалы крупных ТЭЦ, месторождения сульфидных руд, отходы горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий, а также неочищенные хозяйственно-бытовые стоки урбанизированных территорий [21, 22].

В этой связи особую актуальность приобретает комплексное изучение ОСС и РЗЭ в речных водах. В данной работе приведены новые данные по ОСС и РЗЭ в устьевых областях восьми рек юга Приморья.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны восемь разнопорядковых рек юга Приморья, суммарная площадь водосбора которых равна 15 % площади Приморского края (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Краткая характеристика изученных рек

Table 1. Brief description of the studied rivers

Область Region	Река River	Площадь бассейна, км ² Basin area, km ²	Средний расход, м ³ /с Average rate, m ³ /s
II	Цукановка/Tsukanovka	170	3,9
	Гладкая/Gladkaya	458	2,5
I-B	Амба/Amba	242	6,1
	Раздольная/Razdolnaya	16800	71,9
III-B	Кневичанка/Knevichanka	476	3,4
	Артемовка/Artemovka	1460	9,2
	Шкотовка/Shkotovka	714	7,0
	Партизанская/Partizanskaya	4140	42

Примечание. Реки южной части Приморья изучались в трех гидрогеологических областях: Маньчжурской (I); Южно-Приморской (II) и Южно-Сихотэ-Алинской (III) [23]

Note: Rivers of south Primorye were studied in three hydrogeological regions: Manchurian (I); Southern Primorye (I-B) and South Sikhote-Alin (III-B) [23]

Химический состав поверхностных вод Приморья отражает, с одной стороны, различия в составе дренируемых пород, а с другой – особенности гидрогеологического зонирования территории [24]. В пределах Южного Приморья были выделены следующие основные гидрогеологические области [23]:

I – Маньчжурская область – самый южный район Приморского края и всего Дальнего Востока. Реки этой области находятся вблизи российско-китайской границы и многие из них впадают в бухту Экспедиции залива Посьета Японского моря. На территории области присутствуют небольшие наложенные межгорные кайнозойские депрессии, в которых сформированы малые артезианские бассейны, содержащие поровые пластовые напорные воды. Подземные воды, за исключением прибрежных участков, пресные. Поверхност-

ные речные воды подвержены незначительной антропогенной нагрузке.

II – Южно-Приморская область расположена в центральной части Западно-Приморской равнины – Приханкайской низменности от г. Усурийска до пос. Хороль. Реки имеют равнинный характер, располагаются в пределах Ханкайского массива, сложенного преимущественно протерозойскими метаморфическими толщами и палеозойскими гранитоидами [24]. Древние породы Ханкайского массива на значительной территории перекрыты четвертичными, неогеновыми и палеогеновыми рыхлыми отложениями, которые слагают серию впадин мощностью до 1500 м. Водные среды подвержены значительной антропогенной нагрузке из-за широко развитой на данной территории сельскохозяйственной деятельности.

III – Южно-Сихотэ-Алинская область простирается от системы Восточно-Маньчжурских гор до залива Петра Великого Японского моря. Реки имеют незначительную длину и относительно небольшой водосборный бассейн. Основной объем бассейна этих рек сложен комплексом палеозойских осадочных и магматических пород, а также молодыми палеогеновыми базальтами. Для рек этой области характерен быстрый водообмен в системе «вода-порода» и относительно низкая минерализация [23].

Пробы воды для определения ОСС были отобраны в каждой реке 4 раза в год с 2011 по 2015 гг. в наиболее значимые гидрологические режимы: зимнюю межень (январь–март), весенний паводок (май), летнюю (июль–август) и осеннюю межень (сентябрь–октябрь). Концентрация ионов Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ была измерена методом ионно-обменной хроматографии на хроматографе LC-20A Shimadzu. В качестве концентрации гидрокарбонатного иона принималась величина общей щелочности (ТА). рН измеряли потенциометрическим методом [25], общую щелочность (total alkalinity – ТА) анализировали прямым титрованием по методу Бруевича [26]. Общая минерализация речной воды (Σn) определялась как сумма вкладов макрокомпонентов:

$$\Sigma n = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] + [\text{HCO}_3^-]. \quad (1)$$

Обобщенные данные ОСС изученных рек приведены в табл. 2.

Пробы речной воды для определения РЗЭ были отобраны в октябре 2013 г. Сразу после отбора пробы фильтровались и подкислялись азотной кислотой. В работе используются данные только по растворенным формам РЗЭ, в данном случае это содержание элементов в воде, получено при фильтрации через фильтр 0,45 мкм. Анализы воды на РЗЭ были выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в Университете г. Шанхая (East China Normal Universi-

ty, в State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research,) на приборе Element 2 фирмы Thermo Finnigan. Для нормализации полученных величин использовали концентрации РЗЭ в стандартном северо-американском сланце (NASC) [27].

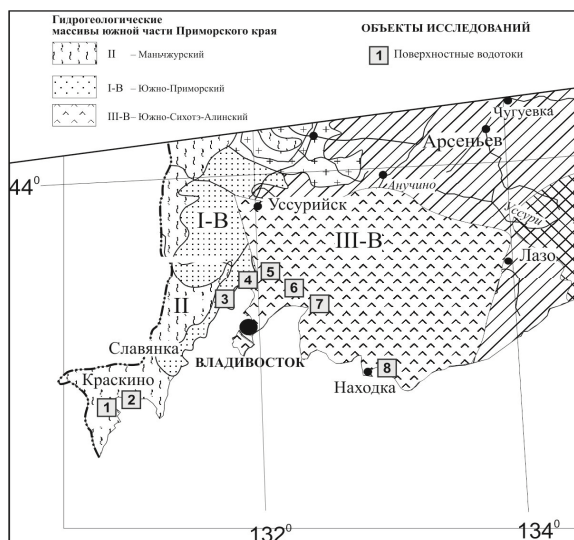


Рис. 1. Карта-схема гидрогеологического районирования (по данным А.Н. Челнокова, 1994) и объектов исследования. Поверхностные водотоки южной части Приморья изучались в трех областях: II – Маньчжурская область (1 – р. Цукановка; 2 – р. Гладкая); I-B – Южно-Приморская область (3 – р. Амба; 4 – р. Раздольная); III-B – Южно-Сихотэ-Алинская область (5 – р. Кневичанка; 6 – р. Артемовка; 7 – р. Шкотовка; 8 – р. Партизанская)

Fig. 1. Schematic map of hydrogeological zoning (according to A.N. Chelnokov, 1994) and research facilities. Rivers of the Southern Primorye were studied in three regions: II – Manchurian (1 is the Tsukanovka; 2 is the Gladkaya); I-B – Southern Primorye (3 is the Amba, 4 is the Razdolnaya); III-B – South Sikhote-Alin (5 is the Knevichanka; 6 is the Artemovka; 7 is the Shkotovka; 8 is the Partizanskaya)

Результаты и их обсуждение

Основной солевой состав

Анализ полученных данных показал, что в 7-ми из 8-ми рассмотренных рек поверхностные воды ультрапресные. Среднегодовые значения Σn в реках Партизанской, Амба, Шкотовке, Цукановке и Гладкой не превышали 100 мг/л, Раздольной и Артемовке – 150 мг/л. Исключение составляет р. Кневичанка, в водах которой среднегодовая величина Σn превышала 250, а в зимнюю межень – 450 мг/л (табл. 2). Минимальные величины Σn для этих 7-ми рек, равные в среднем 58 ± 12 мг/л, наблюдались в период весеннего половодья, когда речные воды были разбавлены слабо минерализованными тальми водами и ультрапресными атмосферными осадками. Максимальные величины Σn во всех рассмотренных реках обнаружены зимой (табл. 2). При этом в реках Шкотовке, Цукановке и

Гладкой Σn возрастала по сравнению с весенним половодьем на 20–40 %, Амбе и Партизанской – почти в 2 раза, Артемовке, Раздольной и Кневичанке – в 3,5 раза. Рост Σn в периоды минимального расхода рек авторы данной работы объясняют усилением роли высоко минерализованного грунтового питания и антропогенной нагрузкой.

По содержанию органического вещества ультрапресные воды южного Приморья достаточно однородны: среднее содержание органического углерода равно $4,1 \pm 0,4$ мг/л, а гуминовых веществ – $2,6 \pm 0,8$ мг/л. Исключение составляет р. Кневичанка, в водах которой концентрация органического углерода и гуминовых веществ в 1,5–2 раза выше, а зимой возрастает до 20 и 12 мг/л, соответственно [28]. Мы полагаем, что дополнительный вклад в величину Σn в р. Кневичанка вносят продукты бактериального разложения комплексов щелочных и щелочноземельных металлов со слабыми органическими кислотами (гуминовыми, полиуроновыми) [29]. Высокие величины ТА ($3,3$ мг-экв/л) и очень низкая концентрация растворенного кислорода (59 мкмоль/л) в р. Кневичанке в период зимней межени являются аргументом в пользу этого механизма.

Таким образом, выявленное сезонное увеличение количества растворенных солей в р. Кневичанке, бассейн которой находится под воздействием муниципальных стоков г. Артема и его окрестностей, является результатом значительной антропогенной нагрузки.

Для того чтобы оценить роль антропогенного фактора в трансформации главных ионов в реках Южного Приморья, мы рассмотрели также сезонное изменение типа минерализации речных вод. Для сравнения разнопорядковых рек использовали содержание ионов в процентах эквивалентов от общей суммы ионов в данной воде, приняв сумму анионов и катионов за 100 %. Анализ полученных данных показал, что во все периоды наблюдений тип минерализации для большинства рек существенно не изменялся: речные воды были гидрокарбонатно-кальциевыми (Раздольная, Партизанская, Шкотовка, Амба и Цукановка) или гидрокарбонатно-натрий-кальциевыми (Артемовка, Кневичанка, Гладкая). Этот результат говорит об однородности источников питания рек юга Приморья, а также характеризует антропогенную нагрузку на их бассейны, которая для большинства рассмотренных рек была минимальной в исследуемый период. В этой связи следует обратить внимание на значительное увеличение доли сульфат ионов в реках Кневичанке, Раздольной и Артемовке в период весеннего половодья. Среднегодовое относительное содержание сульфат ионов во всех рассмотренных реках южного Приморья равно $7,33 \pm 0,56$ % экв., что в 5 раз ниже относительной концентрации гидрокарбонатного иона. Весной доля сульфат ионов в реках Кневичанке, Раздольной и Артемовке возрастает до 14–16 % экв., что отра-

жает влияние антропогенной нагрузки на бассейны этих рек. Разное влияние человеческой деятельности на увеличение концентраций сульфат ионов в речных водах перечислено в работе [30]. В отношении исследуемых нами рек наиболее важными являются два фактора: сжигание угля и нефти на тепловых электростанциях г. Уссурийска (бассейн р. Раздольной) и Артема (бассейн рек Артемовки и Кневичанки) в зимний сезон и сброс коммунально-бытовых стоков от этих же городов в бассейны рек. Одним из продуктов сжигания угля и нефти является двуокись серы, которая выпадает в бассейне этих рек в виде аэрозоля, с дальнейшим образованием сульфат иона. В период снеготаяния и весенних дождей эти сульфаты попадают в речную воду. В период ледостава в местах канализационных стоков образуются гипоксические условия, при этом сера, содержащаяся в органическом веществе, переходит в малоподвижную сульфидную форму. В период весенней аэрации вод сульфидная форма серы превращается в сульфат ион. Таким образом, два человеческих фактора – сжигание топлива и канализационный сток – приводят к увеличению концентрации сульфат ионов в весенний паводок в реках Кневичанке, Раздольной и Артемовке.

Редкоземельные элементы

Региональный уровень суммарных концентраций растворенных форм РЗЭ в речных водах южной части Приморья в трех рассматриваемых ги-

дрогеологических областях изменяется от 0,16 до 2,72 мкг/л (табл. 3). Интервал колебаний содержания РЗЭ в водах отдельных рек составляет от 0,20 до 0,56 мкг/л. Общепринято, что к группе РЗЭ относятся элементы, входящие в 3-ю группу таблицы Менделеева от La до Lu (всего 14 элементов). Их делят на две группы: легкие РЗЭ (LREE) – La, Ce, Pr, Nd, Sm и тяжелые РЗЭ (HREE) – Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, иногда на три: легкие (La–Pr), средние (Nd–Gd), тяжелые (Tb–Lu) [6]. В соответствии с этим делением, в табл. 3 приведены также суммарные концентрации легкой группы РЗЭ (LREE) и тяжелой группы РЗЭ (HREE). Показатель (La/Yb)_n – отношение La к Yb, нормированное к стандартному северо-американскому сланцу [27], используется для определения характера обогащения тяжелыми РЗЭ (Yb) относительно легких (La). Для характеристики величины европия предпочтительно использовать величину европиевой аномалии (Eu/Eu*), которая рассчитывается на основании содержания европия и его соседей: самария и гадолиния, нормированных к стандартному северо-американскому сланцу (табл. 3) [31].

Наиболее высокие концентрации РЗЭ характерны для рек, водосборные бассейны которых расположены в пределах Южно-Приморской области, наиболее низкие были получены для вод Маньчжурской гидрогеологической области. Во всех изученных водотоках концентрации легких РЗЭ в значительной степени выше, чем тяжелых, и колеблются от 81 до 91 % от суммы всех

Таблица 2. TA (мг-экв/л), Σn и параметры ОСС (мг/л) в речных водах юга Приморья

Table 2. TA (mEq/l), Σn and concentrations of BSC (mg/l) in rivers of Southern Primorye

Показатель Indicators	Реки/ Rivers							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Σn	53–87 69(10)	40–59 52(13)	65–126 82(24)	54–198 145(48)	135–454 255(6)	69–239 147(5)	52–72 68(11)	75–133 98(20)
TA	0,36–0,48 0,43	0,29–0,42 0,37	0,53–1,34 0,75	0,40–1,70 1,22	0,75–3,30 1,77	0,43–0,82 0,68	0,43–0,64 0,56	0,62–1,32 0,90
Cl ⁻	6,4–15,3 10,0	5,2–7,5 6,3	5,3–9,1 6,5	5,4–17,2 12,1	18–104 47,3	7,6–66,4 32,5	2,8–7,8 4,7	3,5–5,5 4,5
SO ₄ ²⁻	6,1–7,2 6,8	4,0–4,6 4,3	5,5–7,2 6,2	11,7–15,1 14,5	23,6–36 29,7	12,8–46,2 24,2	5,7–8,0 7,0	7,6–12,5 9,0
Na ⁺	5,8–12,2 8,5	6,4–7,4 6,9	5,7–9,4 6,9	5,2–23,9 14,7	18,4–76 37,9	9,6–44,9 24,1	3,9–5,3 4,4	8,2–13,4 9,7
K ⁺	0,58–1,1 0,84	0,50–0,52 0,51	0,87–1,06 0,96	1,3–2,6 2,0	4,5–12,6 7,2	1,2–3,6 2,1	0,63–0,86 0,75	0,91–0,96 0,93
Ca ²⁺	6,4–7,4 6,8	4,0–6,0 5,0	6,5–12,7 8,3	8,0–25,3 17,8	13,2–26 18,8	7,7–21,0 13,3	7,6–9,1 8,2	9,1–16,5 11,7
Mg ²⁺	1,9–2,8 2,3	1,1–1,7 1,4	3,0–6,1 3,8	2,6–10,0 6,2	4,3–9,1 6,1	2,7–7,6 5,0	2,3–2,7 2,5	2,8–4,4 3,4
Si ⁺	5,5–6,7 6,2	4,3–6,2 5,5	2,7–9,6 7,1	3,0–7,1 5,5	3,8–6,7 4,9	5,5–6,6 5,9	6,1–8,7 7,4	4,7–6,7 5,5
pH _{in situ}	6,51–7,22 6,78	6,46–6,83 6,63	6,55–7,51 7,03	6,87–7,59 7,09	7,1–8,13 7,41	6,89–7,53 7,22	7,52–8,07 7,68	6,90–7,44 7,26

Примечание: 1 – Цукановка, 2 – Гладкая, 3 – Амба, 4 – Раздольная, 5 – Кневичанка, 6 – Артемовка, 7 – Шкотовка, 8 – Партизанская; числитель – пределы изменения, знаменатель – среднее значение, в скобках – число проб).

Note: 1 – Tsukanovka, 2 – Gladkaya, 3 – Amba, 4 – Razdolnaya, 5 – Knevichanka, 6 – Artemovka, 7 – Shkotovka, 8 – Partizanskaya; numerator – the range of variation, denominator – average value, number of samples is in brackets).

РЗЭ, особенно это относится к водотокам Южно-Сихотэ-Алинской области. Такой же диапазон значений по концентрациям легких РЗЭ наблюдаются для большинства водотоков Приморского края (80,7 %) и для рек мира (83,2) (табл. 3).

В пределах Маньчжурской области изучен характер распределения РЗЭ в наиболее крупных реках: Цукановке и Гладкой. Выявлено, что содержание растворенных форм РЗЭ в этих реках изменяется в относительно узких пределах: от 0,16 до 0,32 мкг/л (табл. 3). При этом наиболее высокие концентрации РЗЭ характерны для р. Гладкой, а наиболее низкие – для р. Цукановки. Доля легких РЗЭ находится в пределах от 81 до 85 % от общего состава. Профили распределения РЗЭ в водах водотоков Маньчжурской области, нормированные по отношению к северо-американскому сланцу [27], схожи и сопоставимы между собой по конфигурации, что, скорее всего, связано с низкой антропогенной нагрузкой на эти водотоки (рис. 2). Показатель соотношений La/Yb_n (от 0,57 до 0,84) отражает небольшое обогащение вод тяжелыми РЗЭ.

Все спектры имеют четко выраженную отрицательную цериевую аномалию ($Ce/Ce^* - 0,44-0,71$). В р. Гладкая четко проявлена отрицательная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* - 0,55$), а для р. Цукановка – положительная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* - 1,01$). Для обеих рек отмечается выраженная положительная аномалия диспрозия ($Dy/Dy^* - 1,19-1,33$).

В водах Южно-Приморской области содержание растворенных РЗЭ изменяется в широких пределах: от 0,31 до 2,72 мкг/л (табл. 3). При этом высокие концентрации РЗЭ характерны для рек Раздольной, Артемовки, Шкотовки, а низкие – для р. Амба. Доля легких РЗЭ по отношению к их суммарным концентрациям изменяется от 81 до 88 %, что в целом выше, в сравнении с реками Маньчжурской области. Профили распределения РЗЭ в водах водотоков Южно-Приморской области, нормированные по отношению к северо-американскому сланцу, относительно однотипны и характеризуются обогащением РЗЭ в области неодима – эрбия (рис. 2). Показатель соотношений La/Yb_n изме-

Таблица 3. Содержание растворимых форм редкоземельных элементов в поверхностных водах (мкг/л) южной части Приморского края

Table 3. Concentration of REE in surface water (ug/l) of the Southern Primorye

Области Areas	II		I-B		III-B				9	10
	1	2	3	4	5	6	7	8		
La	0,032	0,069	0,057	0,536	0,115	0,078	0,075	0,030	0,120	0,086
Ce	0,053	0,076	0,087	1,037	0,256	0,138	0,134	0,055	0,262	0,099
Pr	0,008	0,020	0,013	0,134	0,021	0,020	0,021	0,005	0,040	0,025
Nd	0,034	0,076	0,072	0,561	0,075	0,083	0,108	0,086	0,152	0,111
Sm	0,010	0,021	0,019	0,110	0,017	0,022	0,020	0,005	0,036	0,027
Eu	0,002	0,002	0,002	0,017	0,001	0,003	0,003	0,000	0,010	0,007
Gd	0,004	0,016	0,017	0,107	0,032	0,024	0,021	0,008	0,040	0,028
Tb	0,001	0,002	0,003	0,015	0,003	0,004	0,003	0,001	0,006	0,004
Dy	0,008	0,016	0,016	0,094	0,018	0,021	0,017	0,003	0,030	0,021
Ho	0,001	0,003	0,003	0,016	0,004	0,004	0,003	0,001	0,007	0,004
Er	0,005	0,009	0,006	0,042	0,007	0,008	0,009	0,002	0,020	0,012
Tm	0,001	0,001	0,001	0,006	0,001	0,001	0,001	0,000	0,003	0,002
Yb	0,004	0,012	0,009	0,039	0,008	0,011	0,010	0,003	0,017	0,011
Lu	0,000	0,002	0,001	0,006	0,002	0,002	0,001	0,000	0,002	0,002
LREE	0,139	0,264	0,249	2,396	0,485	0,344	0,361	0,182	0,620	0,353
HREE	0,023	0,060	0,057	0,325	0,077	0,074	0,066	0,018	0,125	0,085
$\Sigma=L+H(REE)$	0,162	0,323	0,306	2,721	0,562	0,418	0,426	0,200	0,745	0,438
LREE %	85,6	81,5	81,5	88,2	86,3	82,2	84,6	91,1	83,2	80,7
HREE %	14,4	18,5	18,5	11,8	13,7	17,8	15,4	8,9	16,8	19,3
Y	0,043	0,079	0,070	0,408	0,090	0,096	0,100	0,023	отс	отс.
$(La/Yb)_n$	0,847	0,57	0,63	1,22	1,32	0,71	0,70	1,12	0,68	0,74
Eu/Eu^*	1,01	0,55	0,59	0,69	0,12	0,64	0,55	0,14	1,16	1,07
Ce/Ce^*	0,71	0,44	0,69	0,84	1,12	0,76	0,73	0,93	0,81	0,46
Dy/Dy^*	1,33	1,19	0,81	0,96	0,79	0,83	0,97	0,56	0,76	0,84

Примечание. ΣREE – общая сумма РЗЭ; LREE – сумма легких РЗЭ; HREE – сумма тяжелых РЗЭ; $Eu/Eu^*=2*Eu^*/(Sm^*+Cd^*)$; $Ce/Ce^*=2*Ce^*/(La^*+Pr^*)$; $Dy/Dy^*=2*Dy^*/(Tb^*+Ho^*)$; II – Маньчжурская область (1 – р. Цукановка; 2 – р. Гладкая); I-B – Южно-Приморская область (3 – р. Амба; 4 – р. Раздольная); III-B – Южно-Сихотэ-Алинская область (5 – р. Кневичанка; 6 – р. Артемовка; 7 – р. Шкотовка; 8 – р. Партизанская); 9 – средние значения РЗЭ в мире [32]; 10 – средние значения РЗЭ по Приморскому краю [33]

Note: ΣREE is the total amount of REE; LREE is the sum of light REE; HREE is the sum of heavy REE; $Eu/Eu^*=2*Eu^*/(Sm^*+Cd^*)$; $Ce/Ce^*=2*Ce^*/(La^*+Pr^*)$; $Dy/Dy^*=2*Dy^*/(Tb^*+Ho^*)$; II is the Manchurian region (1 is the Tsukanovka; 2 is the Gladkaya.); I-B is the Southern Primorye region (3 is the Amba, 4 is the Razdolnaya); III-B is the South Sikhote-Alin region (5 is the Knevichanka; 6 is the Artemovka; 7 is the Shkotovka; 8 is the Partizanskaya); 9 is the average value of REE in the world [32]; 10 is the average value of REE for Primorye [33]

няется в значительных пределах от 0,63 до 1,22, что отражает весьма неравномерный характер обогащение вод тяжелыми и легкими РЗЭ. Важной особенностью спектра распределения РЗЭ в этих водах является наличие четко выраженной отрицательной цериевой аномалии ($Ce/Ce^* = 0,69-0,84$) и отрицательной европиевой ($Eu/Eu^* = 0,59-0,69$). В отличие от рек Маньчжурской области спектры распределений РЗЭ вод Южно-Приморской области очень схожи и характеризуются наличием отрицательной аномалии диспрозия ($Dy/Dy^* = 0,81-0,96$).

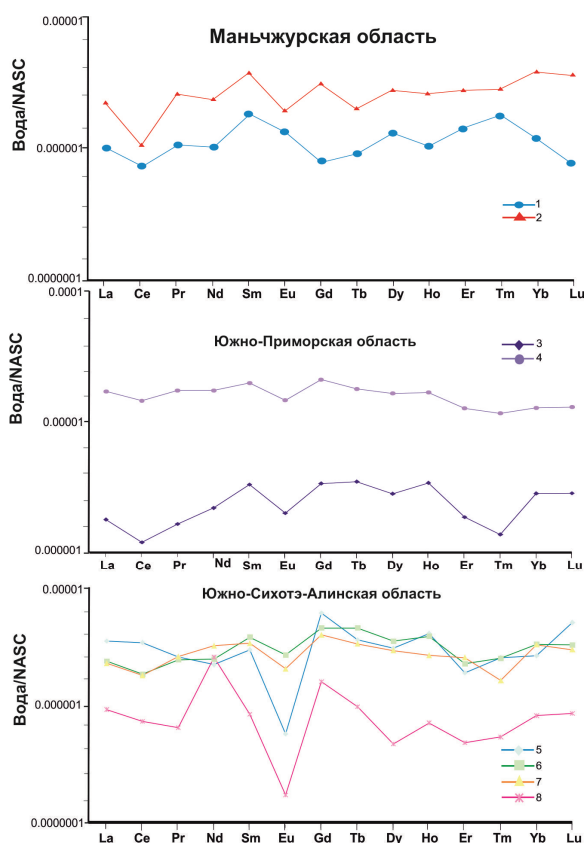


Рис. 2. Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов в поверхностных водотоках юга Приморья, нормированные для трех областей: II – Маньчжурская (1 – р. Цукановка; 2 – р. Гладкая); I–B – Южно-Приморская (3 – р. Амба; 4 – р. Раздольная); III–B – Южно-Сихотэ-Алинская (5 – р. Кневичанка; 6 – р. Артемовка; 7 – р. Шкотовка; 8 – р. Партизанская)

Fig. 2. Distributions of profile of rare earth element concentrations in surface waters of southern Primorye, normalized for 3 regions: II – Manchurian (1 is the Tsukanovka; 2 is the Gladkaya); I–B – Southern Primorye (3 is the Amba, 4 is the Razdolnaya); III–B – South Sikhote-Alin (5 is the Knevichanka; 6 is the Artemovka; 7 is the Shkotovka; 8 is the Partizanskaya)

Особенности водотоков Южно-Сихотэ-Алинской области нашли свое отражение на характере распределений РЗЭ в водных средах. Содержание растворенных форм РЗЭ в водах изученных водо-

токов изменяется от 0,20 до 0,56 мкг/л (табл. 3). При этом наиболее высокие концентрации РЗЭ характерны для р. Кневичанки, а наиболее низкие – для р. Партизанской. Доля легких РЗЭ в общем составе изменяется в широких пределах от 82 до 91 %, что в целом выше по содержанию с реками Южно-Приморской области. Профили распределения РЗЭ в водотоках Южно-Сихотэ-Алинской области, нормированные по отношению к северо-американскому сланцу, отчетливо могут быть разделены на два типа по характеру фракционирования РЗЭ. Первый тип – это воды с высокими концентрациями РЗЭ и обогащенные легкими РЗЭ ($La/Yb_n = 1,12-1,32$). Для вод с низкими концентрациями РЗЭ профили распределения РЗЭ, нормированные к северо-американскому сланцу, характеризуются увеличением тяжелых РЗЭ ($La/Yb_n = 0,70$). Все воды этой области имеют ярко выраженную отрицательную европиевую аномалию ($Eu/Eu^* = 0,12-0,64$). Все спектры вод данной области, кроме реки Кневичанки, имеют четко выраженную отрицательную цериевую аномалию ($Ce/Ce^* = 0,73-0,96$). Положительная Се аномалия реки Кневичанки связана, скорее всего, с сильным загрязнением. Также обнаружена отрицательная аномалия диспрозия ($Dy/Dy^* = 0,56-0,97$).

Уровень содержания растворенных РЗЭ в поверхностных водах зависит от содержания РЗЭ в породах водосборного бассейна, временем взаимодействия вода–порода и влиянием антропогенной нагрузки территории. Эти особенности поведения РЗЭ в пресных поверхностных водах позволяют корректно подойти к оценке регионального фона содержания РЗЭ в растворенном речном стоке отдельных областей Приморья.

Сравнение усредненных значений РЗЭ по областям юга Приморья и данных по распределению РЗЭ по всему Приморскому краю и по рекам мира, нормированных по отношению к североамериканскому сланцу, показало, что профили Южно-Приморской и Южно-Сихотэ-Алинской областей похожи между собой (рис. 3). Отличие профиля Маньчжурской области от профилей других областей связано, скорее всего, с влиянием прибрежной морской акватории и проникновением в русло рек морской воды. Также идет накопление группы средних редкоземельных элементов, что характерно для рек всего Приморского края. Если рассматривать все профили с усредненными значениями по рекам Приморского края, мира и южной части Приморья, то везде выявлена Се-аномалия. В целом профили отличаются друг от друга. А усредненные профили Приморского края и мира очень схожи между собой.

Для всех исследуемых областей южного Приморья характерно наличие отрицательной аномалии Eu. Предполагается, что степень концентрации Eu в поверхностных водах определяется его концентрациями в составе пород водосборного бассейна и косвенно отражает общий геохимический

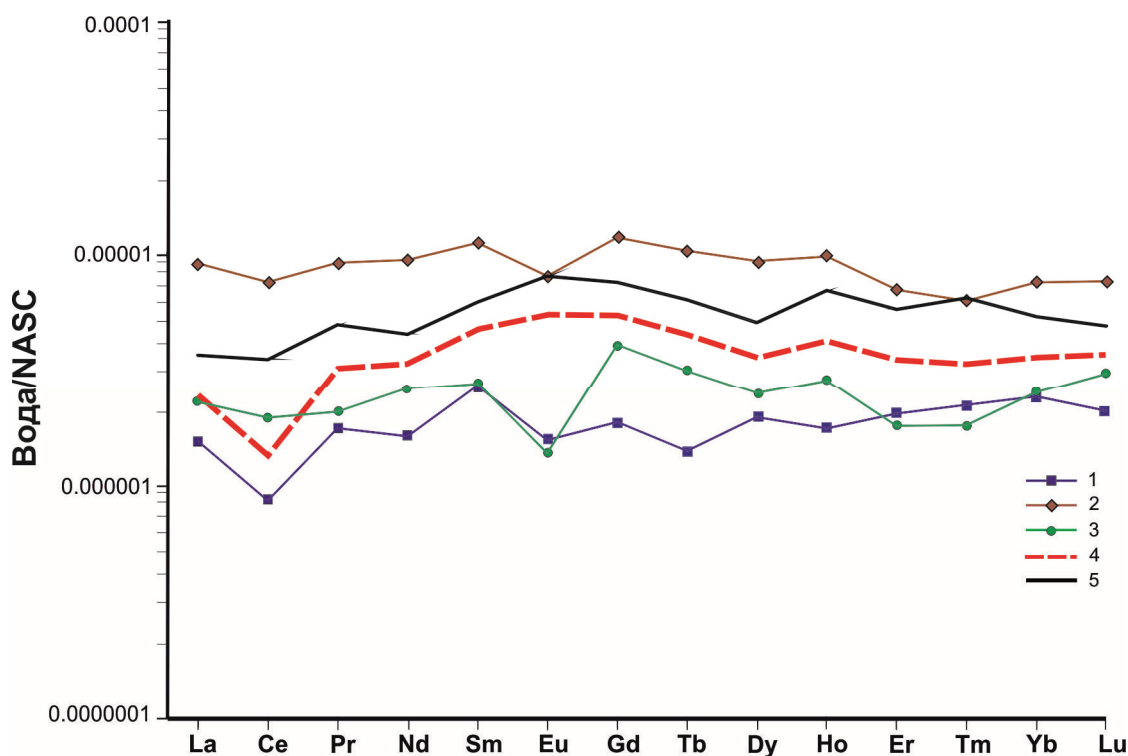


Рис. 3. Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов в водах поверхностных водотоков трех гидрогеологических провинций юга Приморья, нормированные по отношению к северо-американскому сланцу (NASC). Основные гидрогеологические области: 1 – Маньчжурская (среднее из 2 анализов); 2 – Южно-Приморская (среднее из 2 анализов); 3 – Южно-Сихотэ-Алинская (среднее из 4 анализов); 4 – среднее по водотокам Приморья [33]; 5 – среднее по водотокам мира [32]

Fig. 3. Profile distributions of rare earth element concentrations in surface waters of three hydrogeological provinces of Southern Primorye, normalized with respect to the North American shale (NASC). Basic hydrogeological regions: 1 – Manchurian (average over 2 tests); 2 – South-Maritime (average over 2 tests); 3 – South Sikhote-Alin (average over 4 analyzes); 4 – average over the rivers of Primorye [33]; 5 – average over the rivers of the world [32]

фон концентраций РЗЭ зоны гипергенеза определенных территорий [33].

Заключение

1. Сезонные гидрохимические исследования основного солевого состава рек южного Приморья показали, что речные воды ультрапресные, среднегодовые значения Σn не превышали 100–150 мг/л. Тип минерализации для большинства рек существенно не изменялся: речные воды были гидрокарбонатно-кальциевыми или гидрокарбонатно-натрий-кальциевыми. Полученные результаты указывают на однородность источников питания рек юга Приморья, а также характеризуют антропогенную нагрузку на их бассейны, которая для большинства рассмотренных рек была минимальной в исследуемый период.
2. Обнаружено усиление роли антропогенного фактора в трансформации главных ионов в водах рек Кневичанка, Раздольная и Артемовка. Усиление антропогенной нагрузки на бассейны этих рек в период их максимального расхода проявляется в увеличении более чем в 2 раза до-

ли сульфат ионов. Показано, что увеличение количества растворенных солей до 450 мг/л в бассейне р. Кневичанка в период минимального расхода реки обусловлено воздействием муниципальных стоков г. Артема и его окрестностей.

3. Региональный уровень концентраций растворенных форм в изученных пресных поверхностных водах изменяется от 0,16 до 2,72 мкг/л при интервале колебаний содержания РЗЭ в водах отдельных рек от 0,20 до 0,56 мкг/л. Наиболее высокие концентрации РЗЭ характерны для рек, водосборные бассейны которых расположены в пределах Южно-Приморской области. Наиболее низкие концентрации РЗЭ отмечены в водах Маньчжурской гидрогеологической области.
4. Содержание РЗЭ в растворенном стоке пресных вод юга Приморья отражается накоплением РЗЭ средней группы. Во всех водах проявлена отрицательная цериевая аномалия, которая меняет степень окисления с 3^+ на 4^+ , что способствует образованию малорастворимых форм и его быстрому удалению из состава растворов, и

отрицательная аномалия европия, которая обусловлена, скорее всего, его концентрациями в составе пород водосборного бассейна и косвенно отражает общий геохимический фон концентраций РЗЭ в зоне гипергенеза определенных территорий.

5. Высокие содержания растворенных РЗЭ и увеличение количества растворенных солей в поверхностных водах рек, находящихся под воз-

действием муниципальных стоков крупных населенных пунктов – г. Уссурийска (р. Раздольная), г. Артема (реки Артемовка и Кневичанка), пос. Шкотово (р. Шкотовка), – авторы объясняют антропогенной нагрузкой на бассейны этих рек.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: SKLEC-201308, №13-05-91150-ГФЕН_а, РФФИ №16-35-60098 мол_а_док.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hu M.-H., Stallard R.F., Edmond J.M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers // *Nature*. – 1982. – V. 298. – P. 550–553.
2. Stallard R.F., Edmond J.M. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on dissolved load // *J. Geophys. Res.* – 1983. – V. 88. – P. 9671–9688.
3. Gordeev V.V., Sidorov I.S. Concentrations of major elements and their outflow into the Laptev Sea by the Lena River // *Marine Chemistry*. – 1993. – V. 43. – P. 33–45.
4. Zhang J., Huang W.W., Letolle R.C. Jusserand Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes // *J. Hydrol.* – 1995. – V. 168. – P. 173–203.
5. Han Y., Huh Y. A geochemical reconnaissance of the Duman (Tumen) River and the hot springs of Mt. Baekdu (Changbai): weathering of volcanic rocks in mid-latitude setting // *Chemical Geology*. – 2009. – V. 264. – P. 162–172.
6. Behavior of major and minor elements in a temperate river estuary to the coastal sea / S. Patra, C.Q. Liu, F.S. Wang, S.L. Li, B.L. Wang // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* – 2012. – V. 9. – P. 647–654.
7. Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Ч. IV. Реки Дальнего Востока (гидрохимия и гидроэкология) // Монография. – Ростов/Д: НОК, – 2011. – 324 с.
8. Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перепелятников Л.В. Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод Дальнего Востока РФ // *Водные ресурсы*. – 2009. – Т. 36. – № 4. – С. 428–439.
9. Гидрохимический режим эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) / Г.Ю. Павлова, П.Я. Тищенко, Т.А. Михайлик и др. // *Вода: химия и экология*. – 2014. – № 12 (78). – С. 16–25.
10. Гидрохимический режим эстуария реки Партизанской (залив Находка, Японское море) / Г.Ю. Павлова, П.Я. Тищенко и др. // *Водные ресурсы*. – 2015. – Т. 42. – № 4. – С. 396–405.
11. Тарасенко И.А., Зиньков А.В., Оводова Е.В. Инженерно-экологические изыскания при оценке последствий ликвидации шахт в Раздольненском каменноугольном бассейне Приморского края // *Инженерные изыскания*. – 2013. – № 3. – С. 28–37.
12. Sholkovitz E.R. The aquatic geochemistry of rare earth elements in rivers and estuaries // *Aquat. Geochem.* – 1995. – V. 1. – P. 1–34.
13. Rare earth contents of high pCO₂ groundwaters of Primorye, Russia: mineral stability and complexation controls / P. Shand, K.H. Johannesson, O. Chudaev, V. Chudaeva, W.M. Edmunds // *Rare earth elements in groundwater flow system*. / Ed. K. Johannesson. – Netherlands: Springer, 2005. – Ch. 1. – P. 161–186.
14. Shannon W.M., Wood S.A. The analysis of pictogram quantities of rare earth elements in natural waters // *Rare earth elements in groundwater flow system* / Ed. K. Johannesson. – Netherlands: Springer, 2005. – Ch. 1. – P. 1–37.
15. Protano G., Riccobono F. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining area // *Environmental Pollution*. – 2002. – V. 117. – P. 499–514.
16. Фракционирование редкоземельных элементов в реках Восточного и Южного Сихотэ-Алиня в условиях природных и антропогенных аномалий / О.В. Чудаев, Г.А. Челноков, И.В. Брагин и др. // *Тихоокеанская геология*. – 2015. – Т. 34. – № 6. – С. 34–44.
17. Moller P., Dulski P. Rare earth elements and Yttrium in mineral and geothermal waters // *Geochemistry of the Earth's Surface: Proc. on conference*. – Gerstenberger: Balkema, 1999. – P. 527–530.
18. Lawrence M.G., Jupiter S.D., Kamber B.S. Aquatic geochemistry of the rare earth elements and Yttrium in the Pioneer River catchment, Australia // *Marine & Freshwater Res.* – 2006. – V. 57. – P. 725–736.
19. Xu Zh., Han G. Rare earth elements (REE) of dissolved and suspended loads in the Xijiang River, South China // *Applied geochem.* – 2009. – V. 24. – P. 1803–1816.
20. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп: Справ. изд. / А.Л. Бандман, Г.А. Гудзовский, Л.С. Дубейковская, Б.А. Ивин. – Л: Химия, 1988. – 512 с.
21. Баренбойм Г.М., Авандеева О.П., Коркина Д.А. Редкоземельные элементы в водных объектах (экологические аспекты) // *Вода: химия и экология*. – 2014. – № 5. – С. 42–55.
22. Kulaksiz S., Bau M. Rare earth elements in the Rhine river, Germany: First case of anthropogenic lanthanum as a dissolved microcontaminant in the hydrosphere // *Environ. Intern.* – 2011. – V. 37. – P. 973–979.
23. Результаты региональной оценки прогнозных ресурсов минеральных вод Приморского края за 1991–94 гг. / А.Н. Челноков, Б.И. Челнокова, М.В. Дружинина, О.И. Алексеев // ПТГП Гидрогеологической экспедиции. – Владивосток: Фонды Приморгеолкома, 1994. – 500 с.
24. Вах Е.А. Геохимия редкоземельных элементов в природных и техногенных водах юга Дальнего Востока России. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2014. – 168 с.
25. Измерение pH воды с помощью ячейки безжидкостного соединения / П.Я. Тищенко, Ч.Ш. Вонг, Г.Ю. Павлова и др. // *Океанология*. – 2001. – Т. 41. – № 4. – С. 849–859.
26. Интеркалибрация метода Бруевича для определения общей щелочности в морской воде / Г.Ю. Павлова, П.Я. Тищенко, Т.И. Волкова и др. // *Океанология*. – 2008. – Т. 48. – № 3. – С. 477–483.
27. The «North American shale composite»: its composition, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dumeck, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochim. Et Cosmochim. Acta*. – 1984. – V. 48. – P. 2469–2482.
28. Продукционно-деструкционные процессы в эстуариях рек Артемовка и Шкотовка (Уссурийский залив) в летний сезон / П.Ю. Семкин, П.Я. Тищенко, Н.Д. Ходоренко и др. // *Водные ресурсы*. – 2015. – Т. 42. – № 3. – С. 311–321.

29. Тищенко П.Я., Павлова Г.Ю., Шкирникова Е.М. Щелочность Японского моря. Новый взгляд // Океанология. – 2012. – Т. 52. – № 1. – С. 26–39.
30. Berner R.A. Worldwide Sulfur Pollution // J. Geophys. Res. – 1971. – V. 76. – № 27. – P. 6597–6600.
31. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 360 с.
32. Вах Е.А., Харитонова Н.А., Вах А.С. Основные закономерности поведения редкоземельных элементов в поверхностных водах Приморья // Вестник ДВО РАН. – 2013. – № 2. – С. 90–97.
33. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in rivers waters // Treatise on Geochemistry. – 2003. – V. 5 – P. 225–272.

Поступила 08.12.2016 г.

Информация об авторах

Вах Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник кафедры безопасности в чрезвычайных ситуациях и защиты окружающей среды Дальневосточного федерального университета; старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Павлова Г.Ю., кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрохимии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Михайлик Т.А., научный сотрудник лаборатории гидрохимии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Тищенко П.Я., доктор химических наук, заведующий лабораторией гидрохимии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Семкин П.Ю., младший научный сотрудник лаборатории гидрохимии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

UDC 556.314

BASIC SALT COMPOSITION AND RARE EARTH ELEMENTS AS INDICATORS OF ECOLOGICAL STATE OF THE RIVERS OF SOUTHERN PRIMORYE

Elena A. Vakh^{1,2},

Adasea@mail.ru

Galina Yu. Pavlova²,

pavlova@poi.dvo.ru

Tatyana A. Mikhaylik²,

tatyana_libra@mail.ru

Pavel Ya. Tishchenko²,

tpavel@poi.dvo.ru

Pavel Yu. Semkin²,

Pahno@list.ru

¹ Far Eastern Federal University,
8, Sukhanova Street, Vladivostok, 690950, Russia.

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,
43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia.

Relevance. Rare earth elements (REE) and parameters of the basic salt composition (BSC) are the indicators of the ecological state of river waters and they can be used for water subjects monitoring system.

The aim of the research is a comprehensive study of the REE and BSC to identify the factors determining the anthropogenic load on the basins of the rivers of southern Primorye.

Research methods. Concentration of major ions (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) were analyzed by ion chromatography (Shimadzu LC-20A), and REE were studied by mass spectrometry with an inductively coupled plasma (Thermo Finnigan Element 2). pH was measured by potentiometric method, total alkalinity was analyzed by direct titration by Bruyevich method, and total mineralization (Σn) is the total concentration of major ions.

Results. Seasonal hydrochemical study of the BSC of southern Primorye rivers showed that river water is low-mineralized, average annual Σn does not exceed 100–150 mg/l. The investigation detected the significant increase in a part of sulfate ions in rivers Knevichanka, Razdolnaya and Artemovka during the spring flood, which is associated with fuel combustion in winter season, and household sewage. Regional level of total concentration of dissolved REE in the studied surface water varies from 0,16 to 2,72 mg/l. REE interval fluctuations in the water of some rivers is from 0,20 to 0,56 mg/l. High concentration of rare earth elements and dissolved salts in surface water of Razdolnaya, Artemovka, Knevichanka and Shkotovka rivers is associated with anthropogenic load on the basins of these rivers.

Key words:

River, rare earth elements, basic salt composition, hydrochemistry, Southern Primorye.

The research was financially supported by the grants SKLEC-201308, no. 13-05-91150-ГФЕН_а, RFBR 16-35-60098 мол_а док.

REFERENCES

1. Hu M.-H., Stallard R.F., Edmond J.M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers. *Nature*, 1982, vol. 298, pp. 550–553.
2. Stallard R.F., Edmond J.M. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on dissolved load. *J. Geophys. Res.*, 1983, vol. 88, pp. 9671–9688.
3. Gordeev V.V., Sidorov I.S. Concentrations of major elements and their outflow into the Laptev Sea by the Lena River. *Marine Chemistry*, 1993, vol. 43, pp. 33–45.
4. Zhang J., Huang W.W., Letolle R.C. Jusserand Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes. *J. Hydrol.*, 1995, vol. 168, pp. 173–203.
5. Han Y., Huh Y. A geochemical reconnaissance of the Duman (Tumen) River and the hot springs of Mt. Baekdu (Changbai): weathering of volcanic rocks in mid-latitude setting. *Chemical Geology*, 2009, vol. 264, pp. 162–172.
6. Patra S., Liu C.Q., Wang F.S., Li S.L., Wang B.L. Behavior of major and minor elements in a temperate river estuary to the coastal sea. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 9, pp. 647–654.
7. Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A. *Reki Rossii* [Rivers of Russia]. Rostov/D, NOK Publ., 2011. 324 p.
8. Shulkin V.M., Bogdanova N.N., Perepelyatnikova L.V. Spatial and temporal variability of chemical composition of river waters of the Russian Far East. *Water Resources*, 2009, vol. 36, no. 4, pp. 428–439. In Rus.
9. Pavlova G.Yu., Tishchenko P.Ya., Mikhaylik T.A., Semkin P.Yu., Tishchenko P.P., Shkirnikova E.M. *Gidrokhimicheskiy rezhim estuariya reki Razdolnoy (Amurskiy zaliv, Yaponskoe more)* [Hydrochemical regime of the river estuary Razdolnaya (Amur Bay, Sea of Japan)]. *Woda: khimiya u ekologiya*, 2014, no. 12 (78), pp. 16–25.
10. Pavlova G.Yu., Tishchenko P.Ya., Semkin P.Yu., Shkirnikova E.M., Mikhaylik T.A., Barabanshchikov Yu.A. Hydrochemi-

- cal regime of estuary of Partizanskaya river, Nakhodka bay, the Sea of Japan. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 396–405. In Rus.
11. Tarasenko I.A., Zinkov A.V., Ovodova E.V. Engineering-ecological survey when estimating the consequences of liquidation of the Razdolnenskiy Coalfield mines in Primorskiy Krai. *Inzhenerye izyskaniya*, 2013, no. 3, pp. 28–37. In Rus.
 12. Sholkovitz E.R. The aquatic geochemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquat. Geochem.*, 1995, vol. 1, pp. 1–34.
 13. Shand P., Johannesson K.H., Chudaev O., Chudaeva V., Edmunds W.M. Rare earth contents of high pCO₂ groundwaters of Primorye, Russia: mineral stability and complexation controls. *Rare Earth Elements in Groundwater Flow System*. Ed. K. Johannesson. Netherlands, Springer, 2005. pp. 161–186.
 14. Shannon W.M., Wood S.A. The analysis of pictogram quantities of rare earth elements in natural waters. *Rare earth elements in groundwater flow system*. Ed. K. Johannesson. Netherlands, Springer, 2005. Ch. 1, pp. 1–37.
 15. Protano G., Riccobono F. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining area. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, pp. 499–514.
 16. Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Blokhin M.G., Aleksandrov I.A. REE fractionation in the rivers of Eastern and Southern Sikhote Alin with natural and anthropogenic anomalies. *Russian journal of pacific geology*, 2015, vol. 34, no. 6, pp. 34–44. In Rus.
 17. Moller P., Dulski P. Rare earth elements and uttrium in mineral and geothermal waters. *Proceeding on conference Geochemistry of the Earth's Surface*, 1999, pp. 527–530.
 18. Lawrence M.G., Jupiter S.D., Kamber B.S. Aquatic geochemistry of the rare earth elements and yttrium in the Pioneer River catchment, Australia. *Marine & Freshwater Res.*, 2006, vol. 57, pp. 725–736.
 19. Xu Zh., Han G. Rare earth elements (REE) of dissolved and suspended loads in the Xijiang River, South China. *Applied geochem.*, 2009, vol. 24, pp. 1803–1816.
 20. Badman A.L., Gudzovskiy G.A., Dubeykovskaya L.S., Ivin B.A. *Vrednye khimicheskie veshchestva. Neorganicheskie soedineniya elementov I–IV grupp* [Harmful chemicals. Inorganic compounds of elements of groups I-IV]. Leningrad, Khimiya Publ., 1988. 512 p.
 21. Barenboym G.M., Avandeeva O.P., Korkina D.A. Redkozemelnye elementy v vodnykh obektakh (ekologicheskie aspekty) [Rare earth elements in water bodies (environmental aspects)]. *Woda: khimiya u ekologiya*, 2014, no. 5, pp. 42–55.
 22. Kulaksiz S., Bau M. Rare earth elements in the Rhine river, Germany: First case of anthropogenic lanthanum as a dissolved microcontaminant in the hydrosphere. *Environ. Intern.*, 2011, vol. 37, pp. 973–979.
 23. Chelnokov A.N., Chelnokova B.I., Druzhinina M.V., Alekseenko O.I. Rezultaty regionalnoy otsenki prognoznykh resursov mineralnykh vod Primorskogo kraya za 1991–94 gg. [The results of regional assessment of probable resources of mineral waters of Primorye Territory for 1991–1994.]. PGGP *Gidrogeologicheskoy ekspeditsii*, Vladivostok, Fondy Primorgeolkomu, 1994. 500 p.
 24. Vakh E.A. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v prirodnykh i tekhnogennykh vodakh yuga Dalnego Vostoka Rossii* [Geochemistry of rare earth elements in natural and technogenic waters in the south of the Russian Far East]. Vladivostok, Far East Federal University Press, 2014. 168 p.
 25. Tishchenko P.Ya., Pavlova G.Yu., Wong C.S., Johnson W.K., Kang D.-J., Kim K.-R. Measurement of Ph values in seawater using a cell without a liquid junction. *Oceanology*, 2001, vol. 41, no. 4, pp. 849–859. In Rus.
 26. Pavlova G.Yu., Tishchenko P.Ya., Volkova T.I., Dickson A., Wallmann K. Intercalibration of Bruevich method to determine total alkalinity in seawater. *Oceanology*, 2008, vol. 48, no. 3, pp. 477–483. In Rus.
 27. Gromet L.P., Dumek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»: its composition, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochm. Acta.*, 1984, vol. 48, pp. 2469–2482.
 28. Semkin P.Y., Tishchenko P.Y., Khodorenko N.D., Zvalinskii V.I., Mikhailik T.A., Sagalae S.G., Stepanova V.I., Tishchenko P.P., Shvetsova M.G., Shkirknikova E.M. Production-destruction processes in estuaries of the rivers of Artemovka and Shkotovka (Usuri Bay) in summer. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 311–321. In Rus.
 29. Tishchenko P.Y., Pavlova G.Y., Shkirknikova E.M. A new look at the alkalinity of the Sea of Japan. *Oceanology*, 2012, vol. 52, no. 1, pp. 26–39. In Rus.
 30. Berner R.A. Worldwide Sulfur Pollution. *J. Geophys. Res.*, 1971, vol. 76, no. 27, pp. 6597–6600.
 31. Dubinin A.V. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v okeane* [Geochemistry of rare earth elements in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 360 p.
 32. Vakh E.A., Kharitonova N.A., Vakh A.S. Principal regularities of behaviour of rare-earth elements in surface water of Primorye. *Vestnik DVO RAN*, 2013, no. 2, pp. 90–97. In Rus.
 33. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in rivers waters. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 5, pp. 225–272.

Received: 8 December 2016.

Information about the authors

Elena A. Vakh, Cand. Sc., researcher, Far Eastern Federal University; senior researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute.

Galina Yu. Pavlova, Cand. Sc., leading researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute.

Tatyana A. Mikhailik, researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute.

Pavel Ya. Tishchenko, Dr. Sc., head of the laboratory, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute.

Pavel Yu. Semkin, junior researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute.

УДК 553.78:338.314:620.91

ТЕРМАЛЬНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ВОСТОЧНО-ПРЕДКАВКАЗСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА: ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ХАНКАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Фархутдинов Анвар Мансурович¹,
anvarfarh@mail.ru

Хамитов Ильдар Шамилович²,
il.khamitov@gmail.com

Черкасов Сергей Владимирович³,
sergei_v_cherkasov@mail.ru

Минцаев Магомед Шавалович⁴,
ranas@rambler.ru

Зурбеков Шарпутди Шамсутдинович⁴,
zaurbekov@gstou.ru

Шаипов Арби Ахамдиевич⁴,
a.shaipov@gmail.com

Лабазанов Магомед Махмудович⁴,
geologs@mail.ru

¹ Башкирский государственный университет,
Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

² ОАО «Башкирская электросетевая компания»,
Россия, 450096, г. Уфа, ул. Комсомольская, 126.

³ Государственный геологический музей им. акад. В.И. Вернадского,
Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11.

⁴ Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова,
Россия, 364051, г. Грозный, пл. Орджоникидзе, 100.

Актуальность работы обусловлена возрастающим интересом к использованию возобновляемых источников энергии, среди которых особое значение принадлежит термальным подземным водам. Перспективность использования термальных вод обоснована их экологическими преимуществами. Вместе с тем экономические аспекты эксплуатации требуют изучения.

Цель работы: технико-экономический анализ проекта по строительству геотермальной станции с циркуляционной схемой отбора тепла на базе Ханкальского месторождения термальных подземных вод Чеченской Республики.

Методы исследования: расчет экономических показателей инвестиционной привлекательности проекта по строительству Ханкальской геотермальной станции на основе дисконтированных денежных потоков по следующим стандартным показателям: чистый дисконтированный доход, внутренняя норма доходности, срок окупаемости и дисконтированный срок окупаемости; изучение возможных рисков разработки ресурса термальных подземных вод Ханкальского месторождения и способов их минимизации; сравнительный анализ с экономическими показателями газовой котельной, мировым опытом реализации геотермальных проектов, включая рассмотрение государственных методов стимулирования разработки термальных подземных вод.

Результаты. Доказана перспективность использования термальных подземных вод Чеченской Республики. Рассчитаны показатели инвестиционной привлекательности проекта по строительству Ханкальской геотермальной станции, а также аналогичных станций в пределах изучаемой территории, подтверждающие экономическую рентабельность эксплуатации данного ресурса. Рассмотрены преимущества разработки термальных подземных вод Чеченской Республики, а также основные риски, связанные с геотермальными проектами, и способы их минимизации. Дан прогноз по возможному замещению традиционных видов топлива при использовании термальных подземных вод исследуемой области. Разработаны рекомендации по содействию развитию геотермальной энергетики в России.

Ключевые слова:

Геотермальные ресурсы, термальные воды, месторождения подземных вод, альтернативная энергетика, оценка инвестиционной привлекательности.

Введение

Одним из основных источников пополнения бюджета России являются энергоресурсы. Однако постоянный рост в использовании таких традиционных видов энергии, как нефть, газ и уголь приводит к неуклонному сокращению их запасов. В последние годы в мире значительное внимание уделяется нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, и среди них важное значение имеют термальные подземные воды. Россия обладает значительными ресурсами, но лишь их малая часть находит промышленное применение. Наиболее перспективными территориями Российской Федерации по геотермии являются Северный Кавказ и Дальний Восток. На Северном Кавказе одним из регионов, где в прошлом месторождения термальных подземных вод активно разрабатывались, является Чеченская Республика (3-е место по эксплуатационным запасам среди регионов России после Камчатки и Дагестана – 64,7 м³/сут) [1]. Трагические события 1994 г. и последующие экономические проблемы надолго остановили промышленное использование вод и развитие геотермии в республике [2]. В начале 2016 г. Грозненским государственным нефтяным техническим университетом им. акад. М.Д. Миллионщикова, ООО «Ар-энСтройцентр» и Государственным геологическим музеем им. акад. В.И. Вернадского РАН (ГМ РАН) в составе консорциума «Геотермальные ресурсы» при поддержке Минобрнауки и научном сопровождении «Бюро геологических и горных исследований» (BRGM, Франция) реализован трехлетний проект по строительству пилотной геотермальной станции, использующей подземные термальные воды Ханкальского месторождения [3]. В данной статье приводятся общие результаты и освещаются экономические аспекты Ханкальской геотермальной станции и оценка разработки термальных подземных вод Чеченской Республики.

Диверсификация энергетики Чеченской Республики

На Северном Кавказе для полного удовлетворения возрастающих энергетических потребностей экономики и социальной сферы значительная часть используемых энергоресурсов (природный газ, электроэнергия) ввозится из других регионов, что требует дополнительных затрат на транспортировку [4]. Такая топливная зависимость является важным стимулом для освоения местных возобновляемых энергетических ресурсов (табл. 1) [5].

В то же время использование значительных ресурсов термальных подземных вод для различных целей теплоснабжения позволит повысить энергообеспеченность региона, а также снизить потребность в традиционном топливе. Современный объем замещения природного газа геотермальным теплом по югу России весьма незначителен и составляет около 0,12 % от общего объема газопотребления.

Таблица 1. Производство и потребление топливно-энергетических ресурсов в Чеченской Республике за 2014 г. [6]

Table 1. Production and consumption of energy resources in the Chechen Republic for 2014 [6]

Электро-энергия, млн кВт·ч Electricity, million kW·h	Теплоэнергия, тыс. Гкал Heat energy, thousand Gcal	Нефть добытая, тыс. тонн Oil extracted, thousand tons	Газ горючий природный, млн м ³ Natural gas, million m ³
Производство/Production			
2,8	658	447,1	160
Потребление/Consumption			
2536,1	553 (105 потери/ heat loss)	–	1478

Гидрогеологические особенности территории Чеченской Республики определяются ее положением в юго-восточной части Восточно-Предкавказского артезианского бассейна, гидрогеологической структуры общей площадью 250 тыс. км² вместе с субмаринной частью [7]. Основные перспективы исследуемой области связаны с среднемиоценовыми караган-чокракскими отложениями. В пределах Чечни всего разведано 14 месторождений термальных подземных вод, крупнейшим из которых является Ханкальское.

Таблица 2. Оценка тепловых ресурсов месторождений термальных подземных вод Чеченской Республики

Table 2. Assessment of the Chechen Republic geothermal waters deposits thermal resources

Месторождение Deposit	Средняя температура по устьям скважин, °C Average temperature at the wellheads, °C	$T_{\text{добычи}} - T_{\text{глубины}}$, °C	Эксплуатационные запасы, тыс. м ³ /сут Operational reserves, thous. m ³ /day	Выработка тепла, ГДж/сут Heat production, GJ/day	Суммарное количество тепла, ГДж/сут Total amount of heat, GJ/day
Ханкальское Khankala	81,5	36,5	15,6	2145	7347
Червленое Chervlenny	76	31	5,2	607	
Каргалинское Kargaly	96,5	51,5	5,0	970	
Новогрозненское Novogrozny	77	32	3,41	411	
Остальные Others	87,5	42,5	20	3213	

При переходе к разведанным запасам замещение природного газа термальными водами в Чеченской Республике возрастет до 6 % (табл. 3). Расчет суммарной выработки тепла термальными подземными водами производился по формуле [8], адаптированной для установки геотермальных циркуляционных систем теплоотбора (ГЦС) – наиболее рациональному и экологически безопасному на се-

годняшний день способу разработки месторождений термальных подземных вод (табл. 2):

$$G = 10^{-3} \cdot Q \cdot \eta \cdot C \cdot (T_{\text{добычи}} - T_{\text{закачки}}),$$

где G – тепловые ресурсы, ГДж/сут; Q – дебит, м³/сут; $T_{\text{добычи}}$ – температура извлекаемой воды из скважины (в среднем 95 °С); $T_{\text{закачки}}$ – температура закачиваемой воды в пласт (в среднем 45 °С); C – удельная теплоемкость воды (4,186 кДж/кг·°С); η – коэффициент полезного действия пластинчатого теплообменника 0,9.

По результатам оценки вероятная суммарная выработка тепла по месторождениям термальных подземных вод составляет 7,4 тыс. ГДж/сут, что подтверждает высокий ресурсный потенциал среднемиоценового караган-чокракского комплекса на территории Чеченской Республики.

Таблица 3. Сравнительная характеристика значений производства геотермальной энергии и объемов газозамещения по разведанным месторождениям Чеченской Республики

Table 3. Comparative characteristics of geothermal energy production and natural gas replacement potential by the explored deposits of the Chechen Republic

Газ горючий природный, млн м ³ /год Natural gas, million m ³ /year		Запасы, прогнозы термальных вод Reserves, potential reserves of geothermal waters	Потенциал теплопроизводства Heat production potential			Современный и возможный объем газозамещения Current and possible volume of gas replacement	
Производство Production	Потребление Consumption		Категории Categories	Тыс. м ³ /сут thous. m ³ /day	Тыс. Ккал/год thous. Gcal/year	Тыс. т. в. т./год thous. tef/year	млн м ³ /год million m ³ /year
160	1478	Используемые ресурсы Resources used	4,8	78,9	11,27	10,79	0,73
		Разведанные запасы Explored reserves	64,68	641	91,56	87,64	5,93

Финансовые показатели и эффективность Ханкальской проекта

В сравнении с другими технологиями геотермальные проекты предполагают значительные первоначальные инвестиции: затраты на разведку, включающую сейсмические исследования, бурение скважин. Создание геотермальных циркуляционных систем также требует сравнительно высоких вложений в капитальное строительство. Вместе с тем операционные издержки являются низкими, хотя и варьируют в зависимости от количества и качества термальных вод и более предска-

емы в отличие от электростанций, основанных на традиционных источниках энергии, подверженных рыночным колебаниям. Небольшая себестоимость получаемого тепла за счет низких операционных затрат обуславливает конкурентоспособность ГЦС [9].

Ханкальская геотермальная станция не имеет аналогов в России, поэтому величина инвестиций на ее строительство возросла вследствие научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) [5]. Но в дальнейшем планируется поставка инжиниринговых услуг в части монтажа ГЦС, тиражирования полученных результатов, что положительно скажется на эффективности проекта и возврата вложений. Кроме того, станции такого типа обладают потенциалом расширения полезного эффекта за счет возможностей подключения бинарной электростанции и блока извлечения полезных компонентов из теплоносителя – пластовой воды.

Ханкальская геотермальная циркуляционная система (рис. 1) – это изолированная станция со своим сетевым хозяйством. Потребителем является тепличный комплекс, но в будущем она способна обеспечивать энергией предприятия, учреждения и близлежащие объекты сельского хозяйства. Форма участия государства в финансовом обеспечении проекта – субсидирование со стороны Минобрнауки РФ. Финансирование проекта при общей стоимости 430 млн р.: собственные средства – 50 %, бюджетные средства Минобрнауки РФ – 50 %.

Энергосбытовая деятельность проектируемой станции регламентируется действующей нормативно-правовой базой РФ и Чеченской Республики, а также нормативными документами, приказами, распоряжениями и методическими указаниями Министерства энергетики РФ. Взаимоотношения с потребителями электроэнергии строятся на договорной основе в соответствии с гражданским законодательством РФ. Анализ предложения тепловой энергии показывает значительный диапазон в ценах реализации теплоэнергии. В 2015 г. стоимость составила от 880,64 до 1717,68 р. за одну Гкал тепла [11] при среднем тарифе по региону 1284,19 р. [6]. В расчетах также учитывался прогноз Министерства экономического развития РФ по росту стоимости коммунальных услуг до 2018 г. [12].

Затратами на производство теплоэнергии пилотной ГЦС являются: основные и вспомогательные материалы (включая ингибиторы солей), электроэнергия, плата за пользование подземными водами (разовый и регулярные платежи), оплата труда, отчисления от фонда заработной платы, амортизация основных фондов, текущий и капитальный ремонт и др.

Для оценки коммерческой эффективности использования термальных вод на ГЦС рассчитаны стандартные показатели инвестиционной привлекательности проекта [13]: срок окупаемости, ди-



Рис. 1. Схематический рисунок геотермальной циркуляционной системы отбора тепла на Ханкальском месторождении [10]

Fig. 1. Schematic drawing of geothermal circulation system for heat extraction at the Khankala deposit [10]

сcontированный срок окупаемости, чистый дисконтированный доход, внутренняя норма рентабельности. Оценка основывается на ожидаемых в будущем денежных потоках и ставках дисконтирования, поэтому при использовании этого метода применительно к геологическим проектам главная проблема состоит в измерении риска (при оценке ставок дисконтирования) по анализу исторических данных [14]. Однако при пилотном запуске последние отсутствуют. Ставка дисконтирования

взята в размере 16 %, исходя из ставки рефинансирования 11 % и премии за риск, а также мировой практики геотермальных проектов [15]. Расчеты производились непосредственно для Ханкальского проекта (с учетом НИОКР и доходов от последующего тиражирования) (рис. 2) и для строительства станции аналогичной мощности (без НИОКР и тиражирования), а также для сравнения – газовой котельной аналогичной мощности (табл. 4).



Рис. 2. Экономические показатели проекта Ханкальской геотермальной станции

Fig. 2. Economic parameters of the Khankala geothermal station project

Таблица 4. Экономические показатели (15-летний срок эксплуатации)

Table 4. Economic parameters (15 year exploitation period)

	Ханкальский проект Khankala project	Геотермальная станция Geothermal station	Газовая котельная Gas boiler plant	Сравнение Comparison
Капитальные расходы, млн р. Capital expenditures, million rub.	430	130	64,7	
Срок окупаемости, лет Payback period, years	4,6	6,3	5,0	
Дисконтированный срок окупаемости, лет Discounted payback period, years	13,6	>15 (не окупается)	≈15	
Чистый дисконтированный доход, млн р. Net present value, million rub.	324,7	-200	-0,7	
Внутренняя норма доходности, % Internal rate of return, %	18,1	8,7	18,2	

В целом показатели обнаруживают достаточную инвестиционную привлекательность проекта, за исключением реализации тепла, где существенным фактором выступает государственное регулирование тарифов. Для окупаемости проектов по использованию термальных подземных вод необходима государственная поддержка, в том числе в рамках тарифного регулирования.

Инвестиционная привлекательность Ханкальского проекта во многом определяется запланированным в будущем тиражированием результатов в виде строительства аналогичных геотермальных станций. В то же время установка геотермальной станции в сравнении с газовой котельной на сегодняшний день в экономическом плане не выдерживает конкуренции. Такие преимущества, как экологичность использования, геотермальная энергетика, не предполагают прямого сжигания первичного источника энергии [16], возобновляемость и наличие данного ресурса в пределах Чеченской Республики должны привлечь внимание на развитие геотермальной энергетике в пределах региона, для которого, согласно экономической оценке, необходима поддержка на региональном и государственном уровне.

С точки зрения общественной эффективности развитие геотермии имеет важные преимущества. Она способствует созданию новых рабочих мест во время поисков, бурения и строительства геотермальных станций, а также постоянных рабочих мест при введении станции в эксплуатацию [17]. В дальнейшем в Чеченской Республике целесообразно расширение существующего на базе ГНТУ им. академика Миллионщикова научно-исследовательского центра «Геология и геотермальная энергетика» для более детального изучения геотермальных ресурсов и подготовки и переподготовки специалистов. В целях исследований по геотермии и научному сопровождению строительства геотермальных станций центр может быть востребован как в республике, так и за ее пределами.

Риски

Для полноты экономической оценки использования геотермального ресурса необходимо учесть риски, возникающие при реализации ГЦС (рис. 3). Любой промышленный проект подвергается рискам, даже если они не материализуются в конечном счете. Наибольший уровень риска приходится на первую стадию – разведку и бурение, так как существует опасность пустой безводной скважины. С момента успешного бурения уровень риска снижается до приемлемого значения.

Этот риск невысок в случае разработки месторождений Чеченской Республики и Ханкальского месторождения термальных вод, в частности, благодаря высокой разбуренности территории (имеется множество старых скважин Октябрьского нефтяного месторождения), где геология известна, хотя и нуждается в уточнении.

При дальнейшей эксплуатации основной проблемой является возможное снижение температуры ресурса. Для целей прогноза изменения температурного фона в результате обратной закачки и выбора оптимального режима разработки используется компьютерное моделирование [18, 19]. Существует также риск коррозии и отложения солей в скважинах и наземных трубопроводах [20, 21]. Воды XIII продуктивного пласта имеют слабую минерализацию и поэтому невысокую коррозионную активность, что благоприятствует разработке и уменьшает возможные затраты на преждевременную смену скважинного оборудования [22].

К другим факторам риска можно отнести:

- 1) экономические факторы, подавляющее большинство которых не контролируется предприятием: реформирование энергетики в масштабах страны, меняющееся законодательство, нестабильная обстановка в отраслях и т. д.;
- 2) природные условия, в том числе метеорологические. В районе расположения Ханкальской ГЦС среднегодовая температура является оптимальной, поэтому нет как такового риска повреждения оборудования, зданий, а также линий электропередач;

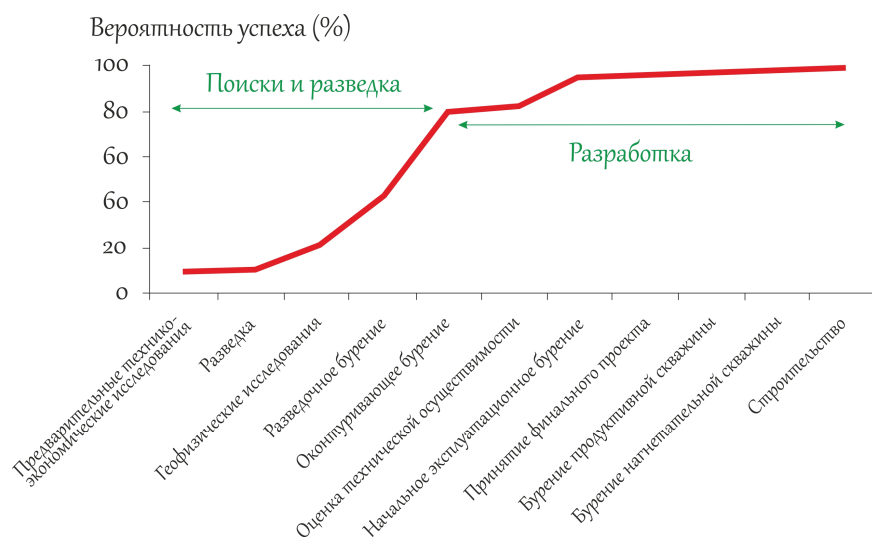


Рис. 3. Вероятность успеха геотермального проекта на различных стадиях [23]

Fig. 3. Probability of the geothermal project success at different stages [23]

- 3) политические риски, среди которых основным является возможное «замораживание» развития промышленности и сельского хозяйства Чеченской Республики, что приведет к снижению спроса в тепловой энергии. Для Ханкальской ГЦС существует риск необоснованного государственного регулирования тарифов: искусственное сдерживание, директивное снижение либо утверждение тарифов, неадекватных затратам станции;
- 4) риск потери активов в результате порчи имущества включает в себя риски вывода объектов энергетики из рабочего состояния и порчи имущества станции вследствие аварий, хищений, природных явлений. Для предотвращения убытков от указанных рисков будут заключаться договоры добровольного страхования имущества от огня и других опасностей;
- 5) технические и операционные риски связаны с эксплуатацией оборудования и обусловлены такими факторами, как отказы оборудования и механизмов, недочеты в проектной документации, отклонения от расчетных свойств внешней среды, ошибки оперативного персонала. На станции ежегодно должны проводиться планово-предупредительные, капитальные и текущие ремонтные работы энергетического оборудования, что позволит продлить его парковый ресурс. В целях снижения операционного риска предполагается проводить обучение работников в институтах повышения квалификации (в частности, в ГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова).

Принципиальной особенностью проекта по строительству ГЦС является инновационный характер. С точки зрения геологических, технических, экономических и маркетинговых параметров данный проект представляет безусловный интерес. Но, как и любой проект инновационной на-

правленности, все потенциальные риски можно изучить только после реализации пилотного проекта, который в случае положительного результата будет способствовать изменению структуры энергопотребления в регионах, обладающих геотермальными запасами.

Необходимые меры для развития геотермальных проектов

Основным барьером для инициации проекта является сложность привлечения финансирования на начальных стадиях разработки. Наличие и качество ресурса не может быть подтверждено до бурения первой скважины, и поэтому инвестиции в начальные стадии проекта имеют высокую степень риска. Результативность бурения разведочных скважин низка (20–60 %) в неисследованных территориях, однако на изученной местности, к которой можно отнести Ханкальское месторождение, вероятность успеха достаточно высока (80–90 %) [23].

Сочетание финансовых механизмов и стимулов – это ключ к успешному геотермальному проекту (табл. 5). Как отмечалось выше, геотермальные проекты характеризуются высокими предварительными расходами и сравнительно низкими операционными издержками. Из этого следует, что гранты могут стимулировать инвестиции, а специальные закупочные тарифы способны обеспечить доходность проекта и увеличить прибыли на стадии эксплуатации. Финансовые институты утверждают, что для традиционных форм финансирования геотермальных проектов на ранних стадиях риски слишком велики, поэтому необходимо привлечение частного капитала или государственных грантов. На заключительных этапах проекта могут быть применены классические схемы финансирования проектов [24].

Таблица 5. Основные преимущества и недостатки финансовых инструментов [24]

Table 5. The main advantages and disadvantages of financial instruments [24]

Инструмент Instruments offered	Сильные стороны Main strengths	Слабые стороны Main weakness
Специальные закупочные тарифы Feed-in Tariffs	Гарантированный доход в течение длительного периода Secure income over a long term period	Действует лишь на заключительных стадиях проекта Acts at a very late project stage
Сокращение налогов Tax reduction	Стимулирует большие капиталовложения Promote increased capital investment	В основном влияет на стадию эксплуатации – момент получения прибыли Affects mainly the operational phase when revenues are generated
Гранты Grants	Заменяют акционерный капитал Substitute equity	Управление государственными средствами Management of public money
Банковские займы Bank Facilities	Дают возможность финансировать проекты, требующие больших объемов инвестиций Possibility to finance projects with high investment volumes	Сложно применить на этапе разведки без использования страхования Difficult to apply at the exploration stage without insurance mechanism
Торговля сертификатами/ система квот Tradable certificates/ Quota systems	Практически не действует государственные средства Deals with very few public money	Нет гарантированного и фиксированного дохода в долгосрочной перспективе No long term secured and fixed income

Одним из способов преодоления главного барьера геотермальных проектов – необходимости финансирования стадий разведки и технико-экономического обоснования, является система страхования геологических рисков. В Европе существуют различные варианты страхования для покрытия геологического риска. Финансирование страхования, как правило, происходит из национальных страховых фондов, которые были созданы по инициативе правительств, желающих поддержать развитие геотермальной энергетики. Некоторые страны также предлагают подлежащие погашению субсидии для бурения первой скважины. Национальные фонды могут предложить гарантии возмещения в случае материализации геологических рисков (например, во Франции, Нидерландах, Швейцарии) или заем, который не подлежит возврату, если риск материализуется (например, Германия, Исландия) [24]. К сожалению, в России на сегодняшний день систем страхования в области геотермальной энергетики не предусмотрено. Реализацию геотермальных проектов здесь затрудняет также отсутствие специальной законодательной базы, регулирующей отношения в данной сфере.

В то же время большой интерес к геотермальной энергетике проявляют органы государственного управления и предприятия коммунального хозяйства Чеченской Республики, Дагестана, Республики Адыгея, Краснодарского края, Томской и Московской областей. Около 50 субъектов федерации одобрили проект «Развитие петротермальной энергетики в России», а также подписали обращение к Президенту РФ о необходимости государственной поддержки и создания структуры для его реализации [25].

Для успешного развития геотермальной энергетики в РФ на настоящем этапе требуется [26]:

- разработка государственной программы поддержки использования геотермальных ресурсов в рамках «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [27];
- формирование федеральной целевой программы «Возобновляемая энергетика»;
- разработка нормативно-методической базы оценки и использования геотермальных ресурсов с учетом современных технологий эксплуатации;
- создание механизмов страхования рисков в данной области;
- организация условий для привлечения частных инвесторов;
- подготовка кадров для геотермальной энергетики.

Решение данных проблем и задач будет значительно способствовать развитию геотермальной энергетики в России и в Чеченской Республике в частности.

Выводы

Экономическая оценка показывает относительную инвестиционную привлекательность проектов по эксплуатации месторождений термальных подземных вод Чеченской Республики. В то же время в сравнении с традиционными источниками топлива использование термальных подземных вод уступает по экономическим показателям, что подтверждает необходимость государственной поддержки развития геотермальной энергетики. Основная цель Ханкальского проекта состоит не только в получении тепловой энергии, но и в ценном опыте, который обеспечит строительство коммерчески успешных геотермальных станций в дальнейшем. Планируемое строительство геотермальных станций на разведанных месторождениях термальных подземных вод с использованием циркуляционной системы теплоотбора будет значительным вкладом в диверсификацию энергетики республики и в повышение эффективности использования термальных вод без ущерба для окружающей среды.

На сегодняшний день переход к таким альтернативным источникам энергии, как геотермальные, является особенно актуальным – 2017 г. Указом Президента объявлен годом экологии.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, договор № 02.G25.31.0056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. – М.: Физматлит, 2012. – 256 с.
2. Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Исмагилов Р.А. История открытия и разработки Ханкальского месторождения термальных вод // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Т. 19. – № 1. – С. 93–97.
3. Перспективы использования геотермальных вод в Предкавказской предгорной зоне (Ханкальское месторождение) / А.М. Фархутдинов, И.М. Фархутдинов, Р.А. Исмагилов, С.В. Черкасов // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – Т. 19. – № 4. – С. 34–43.
4. Дураева Е. Возобновляемая энергия в России: от возможности к реальности. – Париж: Международное энергетическое агентство, 2004. – 120 с.
5. Перспективы развития геотермальной энергетики в Чеченской республике / Ю.Н. Малышев, Х.Э. Таймасханов, Ш.Ш. Заурбеков, М.Ш. Минцаев // Геоэкологические, медико-биологические и рекреационные вопросы устойчивого развития горных территорий. – 2014. – № 1 (19). – С. 63–67.
6. Министерство экономического, территориального развития и торговли Чеченской Республики. URL: <http://econopoly-chr.ru/wp-content/uploads/2013/12/22.07.15-конечный-вариант-форма1.xls> (дата обращения: 07.11.2016).
7. Киссин И.Г. Восточно-Предкавказский артезианский бассейн. – М.: Недра, 1964. – 240 с.
8. Ресурсы термальных вод СССР / под ред. С.С. Бондаренко. – М.: Наука, 1975. – 240 с.
9. Богуславский Э.И., Певзнер Л.А., Хахаев Б.Н. Перспективы развития геотермальной технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – № 5. – С. 142–148.
10. Результаты проекта строительства пилотной геотермальной станции с циркуляционной схемой отбора тепла на Ханкальском месторождении Чеченской Республики / Ш.Ш. Заурбеков, М.Ш. Минцаев, С.В. Черкасов А.А. Шаипов, М.М. Лабазанов, А.М. Фархутдинов // Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности: Материалы третьего международного форума. – Крым, Ялта, 17–19 ноября 2015. – С. 123–136.
11. Государственный комитет цен и тарифов Чеченской Республики. URL: <http://tarif95.ru/content/регулируемые-тарифы-цены-на-коммунальные-услуги-по-чеченской-республике-на-2015-год-в-рублях> (дата обращения: 11.11.2016).
12. Министерство экономического развития Российской Федерации URL: <http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e/1-Прогноз+на+2016-2018+годы.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e> (дата обращения: 21.11.2016).
13. Карев В.П. Математическое моделирование бизнеса – оценка, инвестиционное проектирование, управление предприятием. – М.: Марсейка, 2010. – 347 с.
14. Damodaran A. Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset. – New York: John Wiley & Sons, 2012. – 992 p.
15. Geirdal C., Gudjonsdottir M., Jensson P. Economic comparison of a well-head geothermal power plant and a traditional one // Geothermics. – January 2015. – V. 53. – P. 1–13.
16. Matek B. Promoting geothermal energy: Air emissions comparison and externality analysis. – Washington DC: Geothermal Energy Association, 2013. – 19 p.
17. Kagel A. A Handbook on the Externalities, Employment, and Economics of Geothermal Energy. – Washington, DC, USA: Geothermal Energy Association, 2006. – 65 p.
18. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal water / A. Farkhutdinov, P. Goblet, C. de Fouquet, S.V. Cherkasov // Geothermics. – 2016. – V. 59. – P. 55–56.
19. Ungemach P., Antics M., Lalos P. Sustainable geothermal reservoir management – a modelling suite // Proceedings of Australian Geothermal Energy Conference. – Melbourne, 16–18th November 2011. – P. 267–275.
20. Бекетов С.Б., Коссович Т.А., Штепа С.И. Анализ рисков при реализации научно-технических решений в области бурения и капитального ремонта скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – № 6. – С. 52–54.
21. 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, France / S. Lopez, V. Hamm, M. Le Brun et al. // Geothermics. – 2010. – № 39. – P. 339–356.
22. Kagel A. The State of Geothermal Technology. P. II: Surface Technology. – Washington, DC: Geothermal Energy Association, 2008. – 78 p.
23. Training Course on Geothermal District Heating Manual Book / B. Kepińska, A. Kasztelewicz, P. Dumas, A. Latham, L. Angelino. – Krakow: MEERI PAS, 2014. – 75 p.
24. Financial instruments as support for the exploitation of geothermal energy. Geothermal finance and awareness in European regions (GEOFAR) report. – 2009. – 44 p. URL: http://www.energia.gr/geofar/articlefiles/geofar_report_06_09.pdf (дата обращения: 21.11.2016).
25. Гнатусь Н.А. Петротермальная энергетика России. Основные тенденции в использовании невозобновляемых природных энергетических ресурсов // Технологии мира. – 2012. – № 7 (45). – С. 19–23.
26. The state and prospects for the utilization of geothermal resources in the Russian Federation / S.V. Cherkasov, T.G. Churikova, L.R. Bekmurzaeva, B.N. Gordeichik, A.M. Farkhutdinov // Ecology, Environment and Conservation. – 2015. – V. 21. – Suppl. Iss. – P. 67–77.
27. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.

Поступила 07.12.2016 г.

Информация об авторах

Фархутдинов А.М., ассистент кафедры геологии и геоморфологии Географического факультета Башкирского государственного университета.

Хамитов И.Ш., начальник отдела развития ОАО «Башкирская электросетевая компания».

Черкасов С.В., кандидат геолого-минералогических наук, директор по научной работе Государственного геологического музея им. акад. В.И. Вернадского.

Минцаев М.Ш., доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизации и управления Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова.

Заурбеков Ш.Ш., доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова.

Шаипов А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова.

Лабазанов М.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова.

UDC 553.78:338.314:620.91

GEOHERMAL WATERS OF EAST-CISCAUSASIAN ARTESIAN BASIN: ECONOMICAL ASPECTS OF USING BY THE EXAMPLE OF KHANKALA DEPOSIT

Anvar M. Farkhutdinov¹,

anvarfarh@mail.ru

Ildar Sh. Khamitov²,

il.khamitov@gmail.com

Sergei V. Cherkasov³,

sergei_v_cherkasov@mail.ru

Magomed Sh. Mintshev⁴,

ranas@rambler.ru

Sharputdi Sh. Zaurbekov⁴,

zaurbekov@gstou.ru

Arbi A. Shaipov⁴,

a.shaipov@gmail.com

Magomed M. Labazanov⁴,

geologs@mail.ru

¹ Bashkir State University,
32, Zaki Validi Street, Ufa, 450076, Russia.

² Joint Stock Company «Bashkirian Power Grid Company»,
126, Komsomolskaya Street, Ufa, 450096, Russia.

³ Vernadsky State Geological Museum,
11, Mokhovaya Street, Moscow, 125009, Russia.

⁴ Grozny State Oil Technical University,
100, Ordzonikidze Square, Grozny, 364051, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the growing interest in renewable energy, where geothermal waters have special significance. The prospects for using geothermal waters are proved by their environmental benefits. However, the economic aspects of exploitation need to be studied.

The main aim of the study is the feasibility study of the project for constructing a geothermal plant with a circulating heat extraction scheme on the basis of the Khankala geothermal waters deposit of the Chechen Republic.

The methods used in the study: calculation of the economic parameters of investment attractiveness of the project for constructing the Khankala geothermal plant based on discounted cash flows on the following standard criteria: net present value, internal rate of return, payback period and discounted payback period; study of the possible risks of the Khankala geothermal waters deposit development and ways to minimize them; comparative analysis with gas boiler, worldwide experience of geothermal projects implementation, including consideration of government incentives to stimulate the use of geothermal waters.

The results. The authors have proved the prospects for geothermal waters use in the Chechen Republic, and calculated the indicators of investment attractiveness of the project for constructing the Khankala geothermal plant and similar stations within the study area, confirming the economic feasibility of using this resource. The paper considers the advantages of the development of geothermal waters of Chechnya, as well as the main risks associated with geothermal projects, and the ways to minimize them. The forecast for the possible substitution of fossil fuels by using geothermal waters of the study area is introduced. The recommendations to promote the development of geothermal energy in Russia are given.

Key words:

Geothermal waters, deposits of geothermal waters, alternative energy, evaluation of investment attractiveness.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, agreement no. 02.G25.31.0056

REFERENCES

- Alkhasov A.B. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable energy]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 256 p.
- Farkhutdinov A.M., Farkhutdinov I.M., Ismagilov R.A. History of discovery and development of the Khankala geothermal waters deposit. *Bulletin of Bashkir University*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 93–97. In Rus.
- Farkhutdinov A.M., Farkhutdinov I.M., Ismagilov R.A., Cherkasov S.V. Prospects for using geothermal waters in the Cis-Caucasian submontane zone (Khankala field). *The Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2014, vol. 19, no. 4, pp. 34–43. In Rus.
- Duraeva E. *Vozobnovlyаемая энергия в России: от возможности к реальности* [Renewable energy in Russia. From possibility to reality]. Paris, International energy agency, 2004. 120 p.
- Malyshev Yu.N., Taymashanov H.E., Zaurbekov Sh.Sh., Mintsaevev M.Sh. Perspektivy razvitiya geotermalnoy energetiki v Chechenskoj respublike [Geothermal resources of the Chechen Republic: current state and prospects]. *Geoekologicheskije, mediko-biologicheskije i rekreatsionnye voprosy ustoychivogo razvitiya gornyx territorij*, 2014, no. 1 (19), pp. 63–67.
- Ministerstvo ekonomicheskogo, territorialnogo razvitiya i torgovli Chechenskoj Respubliki [The Ministry of Economic, Territorial development and Trade of the Chechen Republic]. Available at: <http://economy-chn.ru/wp-content/uploads/2013/12/22.07.15-konечный-вариант-форма1.xls> (accessed 07 November 2016).
- Kissin I.G. *Vostochno-Predkavkazskij artezijskij bassejn* [The East-Ciscaucasian artesian basin]. Moscow, Nedra Publ., 1964. 240 p.
- Resursy termalnykh vod SSSR* [The resources of geothermal waters of the USSR]. Ed. by S.S. Bondarenko. Moscow, Nauka Publ., 1975. 240 p.
- Boguslavskij E.I., Pevzner L.A., Khakhaev B.N. Perspektivy razvitiya geotermalnoy tekhnologii [Prospects for development of geothermal technologies]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2000, no. 5, pp. 142–148.
- Zaurbekov Sh.Sh., Mintsaevev M.Sh., Cherkasov S.V., Shaipov A.A., Labazanov M.M., Farkhutdinov A.M. Rezultaty proekta stroitelstva pilotnoj geotermalnoy stantsii s tsirkulyatsionnoj skhemoy otbora tepla na Khankalskom mestorozhdenii Chechenskoj Respubliki [The results of a pilot project of a geothermal plant with a circulating system of heat extraction at the Khankala deposit of the Chechen Republic]. *Vozobnovlyаемая энергетика: puti povysheniya energeticheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti. Materialy tret'ego mezhdunarodnogo foruma* [Proc. of the third International forum. Renewable Energy: Towards Raising Energy and Economic Efficiencies]. Crimea, Yalta, 2015. pp. 123–136.
- Gosudarstvenny komitet tsen i tarifov Chechenskoj Respubliki* [State Committee of prices and tariffs of the Chechen Republic]. Available at: <http://tarif95.ru/content/регулируемые-тарифы-цены-на-коммунальные-услуги-по-чеченской-республике-на-2015-год-в-рублях> (accessed 11 November 2016).
- Ministerstvo ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federatsii* [Ministry of Economic development of the Russian Federation]. Available at: <http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e/1-Прогноз+на+2016-2018+годы.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e> (accessed 21 November 2016).
- Karev V.P. *Matematicheskoe modelirovanie biznesa – otsenka, investitsionnoe proektirovanie, upravlenie predpriyatim* [Mathematical modeling of business – evaluation, investment planning, business management]. Moscow, Maroseyka Publ., 2010. 347 p.
- Damodaran A. *Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset*. New York, John Wiley & Sons, 2012. 992 p.
- Geirdal C., Gudjonsdottir M., Jensson P. Economic comparison of a well-head geothermal power plant and a traditional one. *Geothermics*, January 2015, vol. 53, pp. 1–13.
- Matek B. *Promoting geothermal energy: Air emissions comparison and externality analysis*. Washington, DC, Geothermal Energy Association, 2013. 19 p.
- Kagel A. *A Handbook on the Externalities, Employment, and Economics of Geothermal Energy*. Washington, DC, USA, Geothermal Energy Association, 2006. 65 p.
- Farkhutdinov A., Goblet P., de Fouquet C., Cherkasov S.V. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal water. *Geothermics*, 2016, vol. 59, pp. 55–56.
- Ungemach P., Antics M., Lalos P. Sustainable geothermal reservoir management – a modelling suite. *Proc. of Australian Geothermal Energy Conference*. Melbourne, 16–18th November 2011. pp. 267–275.
- Beketov S.B., Kossovich T.A., Shtepa S.I. Analiz riskov pri realizatsii nauchno-tekhnicheskikh reshenij v oblasti bureniya i kapitalnogo remonta skvazhin [Risk analysis in implementation of scientific and technical solutions in the field of drilling and workover]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2005, no. 6, pp. 52–54.
- Lopez S., Hamm V., Le Brun M. 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, France. *Geothermics*, 2010, no. 39, pp. 339–356.
- Kagel A. *The State of Geothermal Technology. P. II: Surface Technology*. Washington, DC, Geothermal Energy Association, 2008. 78 p.
- Kępińska B., Kasztelewicz A., Dumas P., Latham A., Angelino L. *Training Course on Geothermal District Heating Manual Book*. Krakow, MEERI PAS, 2014. 75 p.
- Financial instruments as support for the exploitation of geothermal energy. Geothermal finance and awareness in European regions (GEOFAR) report*. 2009. 44 p. Available at: http://www.energia.gr/geofar/articlefiles/geofar_report_06_09.pdf (accessed 21 November 2016).
- Gnatus N.A. Petrotermalnaya energetika Rossii. Osnovnye tendentsii v ispolzovanii nevozobnovlyаемых prirodnykh energeticheskikh resursov [Russian petrotermal energy. Major trends in using non-renewable natural energy resources]. *Tekhnologii mira*, 2012, no. 7 (45), pp. 19–23.
- Cherkasov S.V., Churikova T.G., Bekmurzaeva L.R., Gordeyehik B.N., Farkhutdinov A.M. Sostoyanie i perspektivy ispolzovaniya geotermalnykh resursov v Rossijskoj Federatsii [Current state and prospects of geothermal resources use in the Russian Federation]. *GEOENERGY: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of International scientific and technical conference. Geoenergy]. Grozny, 2015. pp. 303–322.
- Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem pravitelstva RF ot 13 noyabrya 2009 g. no. 1715-p* [Energy Strategy of Russia for the period up to 2030 approved by decree no. 1715-r of the Government of the Russian Federation dated 13 November 2009].

Received: 7 December 2016.

Information about the authors

Anvar M. Farkhutdinov, assistant, Bashkir State University.

Ildar Sh. Khamitov, head of the department, Joint Stock Company «Bashkirian Power Grid Company».

Sergei V. Cherkasov, Cand. Sc., director, Vernadsky State Geological Museum.

Magomed Sh. Mintshev, Dr. Sc., head of the department, Grozny State Oil Technical University.

Sharputdi Sh. Zaurbekov, Dr. Sc., professor, head of the department, Grozny State Oil Technical University.

Arbi A. Shaipov, Cand. Sc., associate professor, Grozny State Oil Technical University.

Magomed M. Labazanov, Cand. Sc., associate professor, Grozny State Oil Technical University.

УДК 551.583:556.013

КЛИМАТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ФАЗУ ЗАМЕДЛЕНИЯ ПОТЕПЛЕНИЯ (1986–2015 гг.) И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА 2021–2030 гг.

Паромов Владимир Валериянович¹,

pvv0266@mail.ru

Земцов Валерий Алексеевич¹,

zemtsov_v@mail.ru

Копысов Сергей Геннадьевич^{1,2},

wosypok@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 10/3.

Актуальность. Наиболее очевидным проявлением климатических изменений в настоящее время является повышение приземной температуры воздуха. Региональные и локальные показатели изменения климата отличаются от глобальных. Происходит трансформация гидрологического цикла, водного баланса территории, стока рек, что, в свою очередь, сказывается на климатических процессах. Для предсказания реакции геосистем и их гидроклиматических ресурсов на климатические изменения необходимо иметь четкие представления о характере современных изменений климата и прогнозные оценки на ближайшие десятилетия с конкретной географической привязкой.

Цель работы: 1) оценка климатических изменений на территории Западной Сибири на основе статистического анализа рядов месячных температур воздуха и атмосферных осадков по состоянию на 2015 г., 2) прогноз поля средних за период 2021–2030 гг. температур воздуха и осадков и 3) определение климатообусловленных изменений водного баланса территории и режима стока воды.

Методы исследования. Анализ и прогнозирование пространственно-временной изменчивости наблюдаемой на метеостанциях региона приземной температуры воздуха и атмосферных осадков выполнены статистическими методами в пакете STATISTICA (регрессионный анализ, анализ трендов, кластер анализ для классификации объектов, экспоненциальное сглаживание и прогнозирование). Средние за базовый (1966–1985), современный (1986–2015) и прогнозный (2021–2030 гг.) периоды оценки составляющих водного баланса суши определены с месячным разрешением методом гидролого-климатических расчетов В.С. Мезенцева.

Результаты. Показано, что современный 30-летний климатический период отличается от предыдущего более высоким энергетическим уровнем (температурами воздуха), но на этом фоне в некоторые месяцы наблюдаются не только восходящие, но и нисходящие тенденции температуры. Выполнен прогноз средних температур и осадков по 31 метеостанции на период 2021–2030 гг. за зиму и, по месяцам – за теплый период года. Оценки за современный и прогнозный периоды позволили рассчитать средние показатели режима осадков, испарения, стока воды и влажности деятельного слоя почвы по данным метеостанций, расположенных в разных природных зонах Западно-Сибирской равнины. Прогнозируемый рост температуры и испарения не приводит к ожидаемому снижению стока даже в южных районах недостаточного увлажнения. В то же время влажность почвы в летний период, согласно расчетам, повсеместно снизится.

Ключевые слова:

Гидроклиматические ресурсы геосистем, водный баланс, Западная Сибирь, метод гидролого-климатических расчетов, температура воздуха, атмосферные осадки, анализ и прогнозирование временных рядов.

Западно-Сибирская равнина – одна из крупнейших аккумулятивных низменных равнин земного шара. Она простирается на площади почти 3 млн км² с севера на юг от берегов Карского моря до степей Казахстана, от Урала на западе до Енисея на востоке. Равнина имеет форму трапеции: расстояние от южной ее границы до северной достигает почти 2500 км, а ширина, соответственно на юге и севере, – от 1900 до 800 км. Равнинность территории обуславливает отчетливо выраженную зональность климата и ландшафтов Западной Сибири – от тундровых на севере до степных на юге.

Характерными последствиями глобального потепления, существенными для России и, в особен-

ности, Западной Сибири, являются увеличение температуры воздуха, изменение характера циркуляции атмосферы, изменение величины осадков и режима их выпадения, снежного покрова, влаго-содержания почвы, речного стока, деградация многолетней мерзлоты. Региональные и локальные показатели изменения климата отличаются от глобальных. Для предсказания реакции геосистем на климатические изменения (в нашем случае – гидрологических систем) необходимо иметь четкие представления о характере современных изменений климата и прогнозные оценки на ближайшие десятилетия с конкретной географической привязкой.

Состояние исследований

Результаты современных исследований изменения климата, в том числе в Западной Сибири, широко представлены и обобщены в [1–6]. С начала XXI в. обнаруживается замедление роста глобальной приземной температуры воздуха, разгорелась дискуссия о «наблюдаемой паузе в глобальном потеплении» [4].

Западная Сибирь и Центральная Азия, например, в 2004–2009 гг. стали евразийским центром локализации отрицательных трендов среднегодовой температуры воздуха [7]. Рассмотрение направленности трендов температуры за многолетний период приводит авторов указанной работы к выводу о наличии в изменении климата мощной колебательной составляющей естественного происхождения, демпфирующей прогнозируемое по глобальным моделям климата резкое потепление за счет усиления парникового эффекта. Еще более сильный отрицательный тренд имеет зимняя температура воздуха – в 1995–2015 гг. во всей Западной Сибири, за исключением прибрежных северных районов [8]. В [9] исследуется изменчивость среднегодовой температуры почво-грунтов на глубине 320 см и расчетной глубины их протаивания в зоне распространения многолетней мерзлоты на метеостанциях России в 1963–2011 гг. Исследование трендов этих параметров за весь указанный период и в 2001–2011 гг. показало в последнем случае отчетливый тренд понижения температуры – 0,2–0,6 °C/10 лет на востоке и юго-востоке Западной Сибири в секторе 70–90° в.д. Делается вывод, что изменения климата содержат мощную колебательную составляющую естественного происхождения, которая не слабее экспоненциальной составляющей, предвычисляемой по моделям глобального климата в зависимости от усиления парникового эффекта.

В докладе [4] показано, что с конца XX в. на территории России в формировании погоды зимой и летом ведущую роль играют блокирующие процессы в атмосфере. Тенденции понижения зимних температур связываются с изменчивостью атмосферной циркуляции [9]. В [10] рассмотрена изменчивость регионального климата собственно в Западной Сибири, в частности атмосферной циркуляции за период 1976–2014 гг. Показано, что потепление зимой сменилось похолоданием в 1985–2014 гг., связанным с ослаблением зонального переноса воздушных масс вследствие уменьшения меридионального температурного градиента.

Возможные механизмы формирования крупных погодно-климатических аномалий в последние годы в контексте глобальных изменений климата и естественных квазициклических процессов обсуждаются в [11]. Экстремальные волны тепла и холода на территории России (экстремальная жара в Европейской части страны в 2010 г., наводнение на Амуре 2013 г.) связываются с формированием долговременных блокирующих антициклонов.

Частота их появления может возрастать по мере потепления климата. При этом нужно учитывать эффекты, относящиеся к региональным и глобальным естественным квазициклическим процессам, таким, как атлантическое долгопериодное колебание, тихоокеанская десятилетняя осцилляция и явление Эль-Ниньо – южное колебание [11].

Добавим, что подобная ситуация блокирования западного переноса сложилась практически на всей территории Западной Сибири в 2011–2012 гг., когда, после засушливой осени 2011 г. и холодной зимы с малым количеством снега, весной и в начале лета максимальные расходы воды в половодье на реках Обь, Томь, Иртыш и их притоках в 2012 г. были экстремально низкими для соответствующих сезонов [12]. Возникли проблемы с наполнением Верхне-Иртышского каскада водохранилищ в Казахстане [13], Новосибирского водохранилища на Оби. В зоне многолетней мерзлоты на севере Западной Сибири равнины к августу почти высохли термокарстовые озера [14].

Н.В. Вакуленко и др. [15] обосновывают вывод, что современные глобальные климатические модели проекта SMIP-5, используемые для долгосрочного прогноза климатических изменений, не способны достаточно реалистично описать структуру температурной изменчивости в масштабах от одного до нескольких десятилетий. Эти модели предсказывают ускорение роста температуры, и они по своей разрешающей способности вряд ли могут учесть возможное продолжение перерыва в потеплении или даже некоторое похолодание в ближайшие одно–два десятилетия. Указанного недостатка, видимо, можно избежать путем совмещения многолетних трендов температуры, получаемых по ансамблям физико-математических моделей, со статистическим моделированием ритмов [16].

Таким образом, до настоящего времени нет достаточного понимания дальнейшей динамики климатических изменений. Интенсивность потепления в Западной Сибири, за исключением ее прибрежных арктических районов, заметно понижается в последние десятилетия. Данные за разные интервалы времени противоречивы. Глобальные климатические модели имеют слабые стороны в прогнозировании в масштабе одного–двух десятилетий – они учитывают в основном рост концентрации парниковых газов в атмосфере в длительной перспективе.

Гидрологический режим территории претерпевает определенные трансформации в процессе изменения климата [17]. Для оценки изменений водного баланса применяются разные гидрологические модели. В частности, в относительно слабо изученных в гидрометеорологическом отношении регионах для расчета водного баланса показал свою эффективность метод гидролого-климатических расчетов (ГКР) В.С. Мезенцева [18, 19], который позволяет задавать на входе прогнозные значе-

ния температуры воздуха, атмосферных осадков и параметров ландшафта (возможно, трансформированных климатическими изменениями) и получать на выходе характеристики водного баланса, соответствующие новым заданным условиям его формирования.

В ходе выполненного нами исследования решались следующие задачи: 1) оценка произошедших климатических изменений в Западной Сибири на основе статистического анализа рядов месячных температур воздуха и осадков за климатические сезоны года по состоянию на 2015 г., 2) статистическое прогнозирование полей средних значений этих характеристик на период 2021–2030 гг. и 3) исследование влияния изменения климатических характеристик за современный (1986–2015 гг.) и прогнозный (2021–2030 гг.) период на многолетние характеристики водного баланса и, в частности, режим «климатического» стока с месячным разрешением за теплый период года.

Исходные данные и методы исследования

На первом этапе исследована пространственно-временная изменчивость приземной температуры воздуха и атмосферных осадков за 30-летний климатический период 1986–2015 гг. по отношению к норме. Для анализа изменения температуры воздуха и атмосферных осадков за зимний (ноябрь–март), летний (июнь–август) сезоны и за год использованы среднемесячные данные по 31 репрезентативным метеостанциям Росгидромета (рис. 1), относительно равномерно расположенным на Западно-Сибирской равнине (за исключением ее арктического побережья), за 1966–2015 гг. [20]. Метеостанции находятся в разных ландшафтных зонах, данные наблюдений на станциях, находящихся в крупных городах, не учитывались.

Ряды средних за выделенные сезоны и за календарный год приземных температур воздуха преобразовывались в значения отклонений от среднего за период 1966–1985 гг. (аномалии температур, ΔT °C), который был условно принят за базовый (климатическая норма), т. е. до начала современных климатических изменений. Выбор 1985 г. в качестве граничного объясняется тем, что с середины 1980-х гг. отмечается начало наиболее резкого потепления в Северном полушарии [21]. Этот выбор подкрепляется и результатами исследования многолетней изменчивости 72 показателей, включающих ключевые характеристики климатической системы (факторы) в совокупности с биотическими и абиотическими характеристиками наземных и морских экосистем (респонденты) на глобальном, региональном и локальном уровнях за период до 2010 г. [22]. Показано, что в 1980-х гг. произошло повсеместное существенное изменение, в ряде случаев скачкообразное, в режиме биофизических (включая гидрометеорологические) систем Земли, от верхней атмосферы до глубин океана и от Арктики до Антарктики. В каче-

стве причины такого изменения называется быстрое потепление климата, имеющее смешанную природу, как антропогенную, так и естественную.

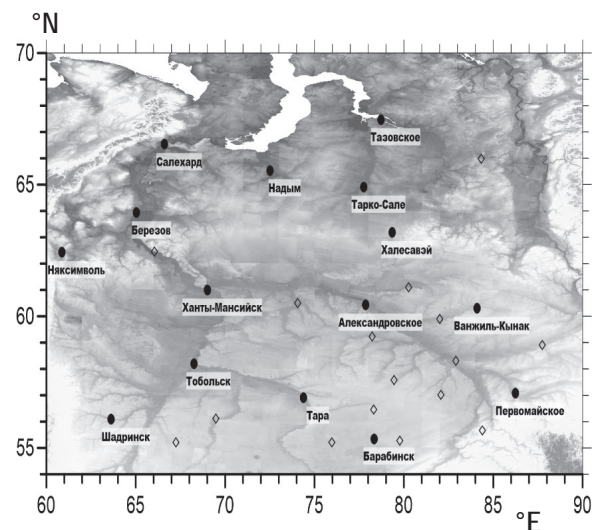


Рис. 1. Расположение 31 метеорологической станции Росгидромета, данные по которым использованы для прогноза на 2021–2030 гг. Данные 15 станций (черные кружки) использованы на первом этапе для более детального анализа климатических изменений

Fig. 1. Location of 31 meteorological stations of Roshydromet the data from which were used for the 2021–2030 forecast. Data from 15 stations (black solid circles) were also used at the first stage for more detailed analysis of climatic changes

Ряды сумм атмосферных осадков за соответствующие сезоны и в целом за календарный год были переведены в значения безразмерного модульного коэффициента k_x , показывающего отношение суммы осадков климатического сезона расчетного года (X_s) к среднемноголетнему ее значению за 1966–1985 гг. ($\bar{X}_{1966-1985}$):

$$k_x = \frac{X_s}{\bar{X}_{1966-1985}}$$

Полученные ряды ΔT и k_x сглаживались с помощью «4253H фильтра» в пакете StatSoft STATISTICA [23]. Этот мощный метод сглаживания (фильтрации) совмещает в себе несколько последовательных преобразований ряда скользящим средним и скользящей медианой. Он позволяет обнаруживать и отслеживать тенденции в рядах гидрометеорологических характеристик.

Для выявления географических особенностей изменения приземной температуры воздуха и осадков сглаженные ряды отклонений от нормы (аномалий) по 31 станциям подвергались регрессионному и кластер-анализу. В частности, принята попытка получить зависимости вида:

$$\Delta T = f(\varphi, \lambda) \quad \text{и} \quad k_x = f(\varphi, \lambda),$$

где φ – географическая широта и λ – географическая долгота метеостанции.

Кластер-анализ использовался в том случае, если не удавалось выявить статистически значимые зависимости показателей от географических координат. В результате кластер-анализа получены однородные по расчетному показателю районы со средними для района значениями отклонений от климатической нормы. В работе использовался иерархический алгоритм кластер-анализа – метод Уорда, в котором критерием качества кластеризации является процесс минимизации внутриклассовой дисперсии.

Статистическая значимость выявленных средних по районам значений отклонений от климатической нормы, как и исходных рядов ΔT и k_x , оценивалась путем анализа рядов на однородность непараметрическим критерием Манна–Уитни.

На втором этапе исследования для прогноза среднесезонных значений температур воздуха и атмосферных осадков на период 2021–2030 гг. индивидуально по каждой из 31 метеостанции (рис. 1) выполнено прогнозирование температуры и осадков с помощью адаптивной модели – метода экспоненциального сглаживания. Характерной чертой адаптивных моделей прогнозирования является наличие механизма самонастройки, позволяющего непрерывно учитывать изменения характеристик временного ряда [24]. Этот метод позволяет делать прогнозы на относительно короткие временные отрезки, когда наличие долговременных тенденций остается под вопросом.

Нами использовались модели экспоненциального сглаживания, включающие линейный либо демпфирующий тренды. При этом выбор модели тренда для каждого временного ряда выполнялся через визуальное оценивание графика наблюдаемых значений. Оптимальные значения используемых при сглаживании параметров α (Alpha), δ (Delta) и γ (Gamma) определялись в пакете STATISTICA автоматическим поиском. Для оценки качества подгонки в целом (для всего ряда) использовалась средняя абсолютная относительная ошибка. В свою очередь, для минимизации средней абсолютной относительной ошибки использовалась квази-ньютоновская процедура.

Полученное значение экспоненциальной средней S_t имеет то же математическое ожидание, что и исходный ряд X_t , но меньшую дисперсию. Следовательно, экспоненциальное сглаживание можно представить как фильтр, на вход которого в виде потока последовательно поступают члены исходного ряда, а на выходе формируются текущие значения экспоненциальной средней. При этом прогнозное значение экспоненциальной средней (\vec{S}_t) всегда имеет систематическую ошибку, т. е. оно смещено по отношению к истинной среднесезонной величине [24].

Для получения прогнозного значения средней за 2021–2030 гг. величины приземных температур воздуха и сумм атмосферных осадков (\vec{S}_t), как средних за сезон, так и за отдельные месяцы с ап-

реля по октябрь, взят базовый 40-летний ряд с 1976 по 2015 гг. Несмещенная среднесезонная величина (\vec{S}_t) находилась через ввод в найденные по соответствующей модели, значения \vec{S}_t поправки на смещение δs_t :

$$\vec{S}_t = \vec{S}_t \pm \delta s_t.$$

При этом оценка δs_t для каждого анализируемого ряда температур и осадков определялась через регрессионный анализ и получение регрессионной модели, параметры которой находились на основе сравнения экспоненциальной средней S_t (смещенной) и действительной средней \vec{X}_t найденных за период 2001–2015 гг. В качестве дополнительных предикторов таких зависимостей, улучшающих качество регрессионной модели, брались географические координаты метеостанций.

Результаты и обсуждение

Уровень климатических изменений в 1986–2015 гг. по отношению к норме. На территории Западной Сибири в последние 30 лет среднесезонные температуры воздуха по отношению к норме повсеместно увеличились. Температура зимы (не считая арктического побережья) в среднем за 30 лет статистически значимо выросла только южнее 62° с.ш., температура же летнего периода показала незначимый прирост на всей исследуемой территории (табл. 1).

Обнаруживается тесная связь аномалий среднегодовой температуры воздуха, а также среднесезонной температуры с географической широтой и долготой. За последние 30 лет прирост температуры зимы и года увеличивается с северо-запада на юго-восток. Для летних температур, которые увеличились в меньшей степени, чем зимние, характерна широтная зависимость – увеличение их прироста с юга на север.

Таблица 1. Средние отклонения приземных температур воздуха за 1986–2015 гг. от климатической нормы и их стандартные ошибки

Table 1. Mean deviations of surface air temperature in 1986–2015 from the climatic norm and their standard errors

Ландшафтные зоны Landscape zones	Величина отклонений Anomalies (°C)		
	Годовые Year (I–XII)	Зимние Winter (XI–III)	Летние Summer (VI–VIII)
Лесотундра – северная тайга Forest tundra to northern taiga	1,2±0,8	1,1±1,1	1,1±0,8
Средняя – южная тайга Middle to southern taiga	1,1±0,5	1,5±1,4	0,6±0,8
Южная тайга – лесостепь Southern taiga to forest steppe	1,0±0,5	1,4±0,8	0,5±0,5

Направленность изменения сумм годовых и сезонных осадков не так однозначна, как у приземной температуры воздуха (рис. 2). Наблюдается заметно более пестрая картина величины и знака измене-

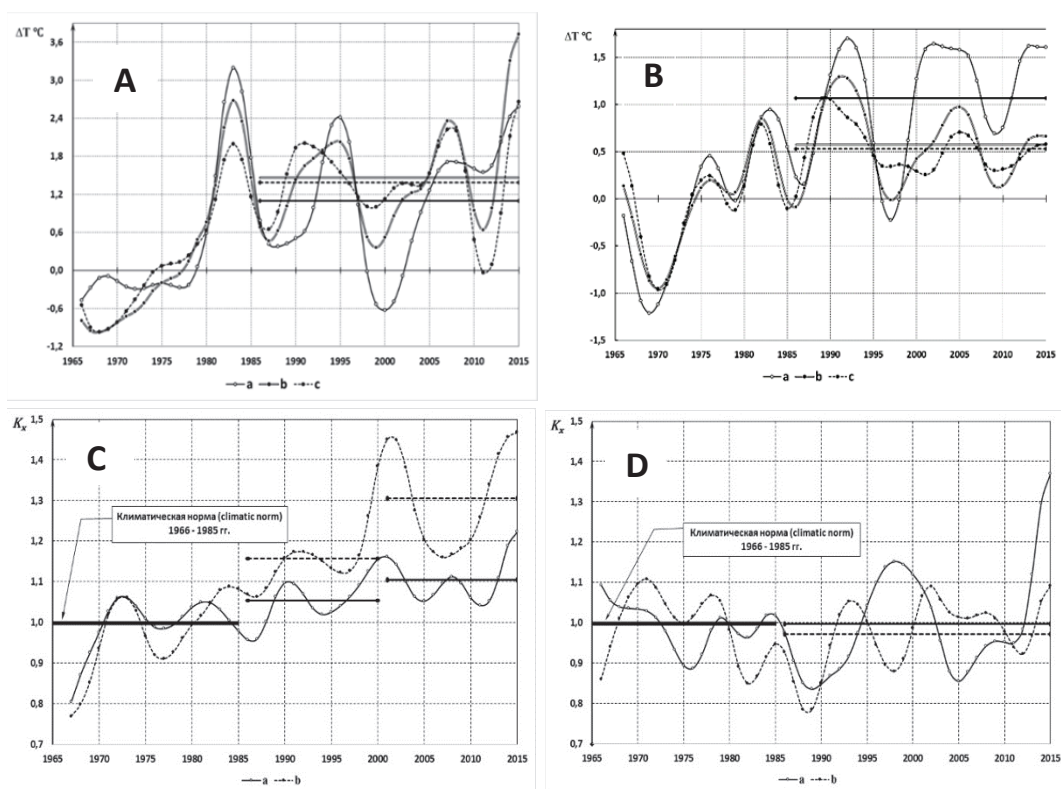


Рис. 2. Вариации температуры и осадков относительно нормы 1966–1985 гг. (сглаженные 4253Н фильтром): А, В – соответственно, зимние и летние температуры в лесотундре – северной тайге (а), средней – южной тайге (б), южной тайге – лесостепи (с); С, D – зимние и летние осадки севернее (а) и южнее (б) 62° с.ш.

Fig. 2. Variations of temperature and precipitation in relation to the 1966–1985 norms (smoothed using the 4253N filter): А, В are respectively, winter and summer temperatures in а) forest tundra to northern taiga, б) middle to southern taiga, с) southern taiga to forest steppe; С, D are winter and summer precipitation north (а) and south (б) from 62°N

ний. Тем не менее, удалось выявить общие закономерности, характерные для Западной Сибири.

Для сумм годовых осадков не удалось выявить какие-либо территориальные закономерности. На метеостанциях наблюдаются разнонаправленные отклонения от нормы, имеющие разную величину. В целом можно говорить о том, что по состоянию на 2015 г. на исследуемой территории осадки стационарны, т. е. примерно равны климатической норме.

Тем не менее, отмечается повсеместное увеличение зимних осадков в пределах рассматриваемой территории. Кластер-анализ показал, что южнее 62° с.ш. происходит более заметный рост осадков холодного периода – в среднем на 23 % по отношению к норме 1966–1985 гг., в то время как севернее прирост также наблюдается, но менее существенный – на 8 %.

Осадки летнего сезона в целом стабильны, однако выделяется область снижения летних осадков в центре Западно-Сибирской равнины, охватывающая таежную зону, подзону осиново-березовых лесов и лесостепь. Это Обь-Иртышское междуречье в пределах Среднеобской низменности и Васюганской равнины (метеостанции Ханты-Мансийск,

Александровское, Тобольск, Тара, Барабинск), где уменьшение осадков в среднем составило 3 %.

Интересно сравнить изменения температуры воздуха и осадков в первую и вторую половину рассматриваемого периода 1986–2015 гг. Особенностью потепления последних 30 лет на территории Западной Сибири, зафиксированной сетью метеостанций Росгидромета, явилось то, что на первом этапе (1986–2000 гг.) наиболее интенсивный рост температур наблюдался в лесостепной зоне, при этом основным «драйвером» роста годовых температур являлось интенсивное потепление холодного периода года. Но уже в первое десятилетие XXI в. наметилось либо замедление, либо остановка увеличения приземных температур воздуха зимнего сезона. Можно говорить о том, что произошел переход среднезимних температур на новый уровень: на 1,9 и 1,1 °C выше климатической нормы, соответственно, южнее и севернее 62° с.ш. в целом за 30-летний период.

Положительная малоинтенсивная динамика прироста среднелетних температур воздуха наблюдалась и в 2001–2015 гг., но только севернее 62° с.ш. Южнее рост летних температур прекратился. Темпы роста среднегодовых температур

практически остались без изменений, существенно замедлившись лишь на юге Западно-Сибирской равнины.

Атмосферные осадки на территории Западной Сибири за первые 15 лет (1986–2000 гг.) 30-летнего периода практически не изменились. Можно лишь отметить снижение летних осадков в лесостепной зоне, компенсированное их увеличением в холодный период года. Но во второе 15-летие (2001–2015) уже имеется статистически значимый прирост сумм зимних осадков на всей территории Западной Сибири, наметилось также увеличение как летних, так и годовых осадков в лесотундре и северной тайге.

Прогноз отклонения средних значений температуры воздуха и атмосферных осадков 2021–2030 гг. от климатических норм 1966–1985 гг. Зимой (ноябрь–март) в северной тайге и лесотундре (без учета арктического побережья) приземная температура воздуха снизится относительно средней за 1986–2015 гг. (табл. 2). На метеостанциях севера Западно-Сибирской равнины восходящая динамика роста температур зимы сменится на нисходящую, но среднесезонная температура останется выше климатической нормы. В среднем зима будет теплее, чем до 1985 г., на 0,4 °С, но холоднее, чем в 1986–2015 гг. В зоне средней и южной тайги прогрессирующее потепление холодного периода года также приостановится, среднесезонные температуры зафиксируются на уровне начала XXI в.

Таблица 2. Средние за разные периоды времени сезонные отклонения приземных температур воздуха и атмосферных осадков от климатических норм (1966–1985 гг.), осредненные по природным зонам

Table 2. The mean seasonal deviations of the near-surface air temperature and atmospheric precipitation in different time periods from the climatic norms (1966–1985), averaged over landscape zones

Ландшафтная зона Landscape zone	Период времени/Time period		
	1986–2000	2001–2015	2021–2030
Изменение средней за период температуры, °С (зима/лето) по отношению к норме Deviation of the temperature mean over the period, °С (winter/summer) from the norm			
Лесотундра – северная тайга Forest tundra to northern taiga	+1,0/+0,4	+1,0/+1,2	+0,4/+1,5
Средняя – южная тайга Middle to southern taiga	+1,4/+0,3	+1,4/+0,6	+1,3/+0,7
Южная тайга – лесостепь Southern taiga to forest steppe	+1,5/+0,6	+1,6/+0,5	+1,7/+0,6
Изменение средних за период осадков, в % (зима/лето) по отношению к норме Deviation of the precipitation mean over the period, % (winter/summer) from the norm			
Лесотундра – северная тайга Forest tundra to northern taiga	+4/–11	+12/+6	+18/+12
Средняя – южная тайга Middle to southern taiga	+6/–7	+18/–2	+23/+1
Южная тайга – лесостепь Southern taiga to forest steppe	+19/–7	+33/–14	+40/–12

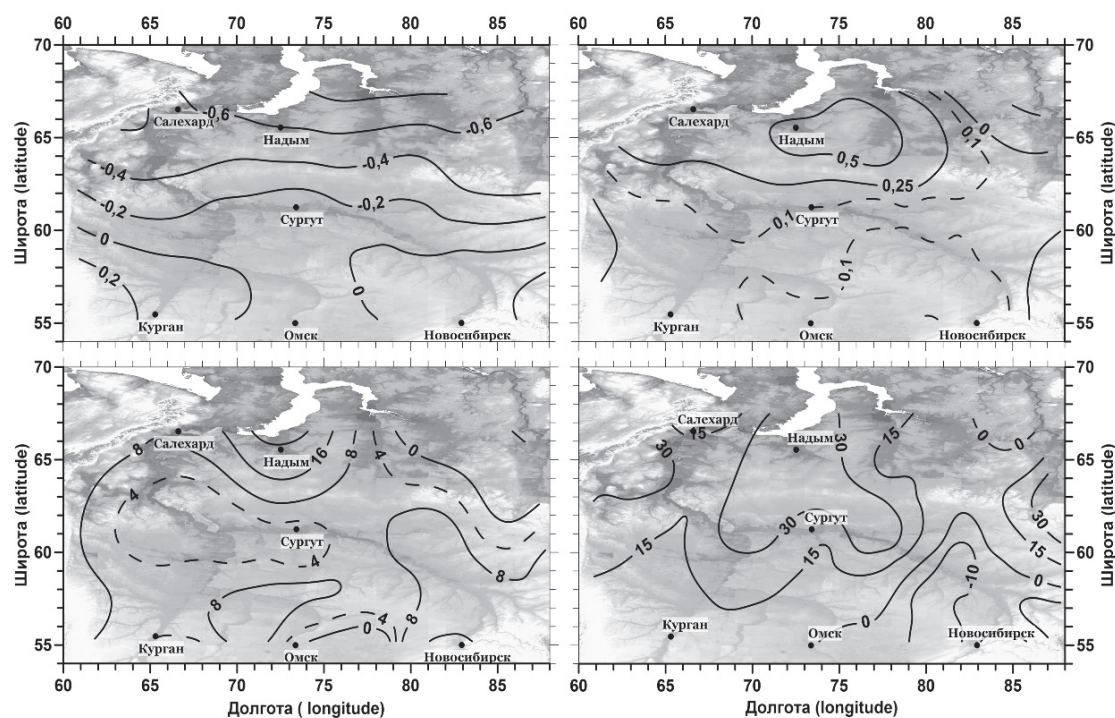


Рис. 3. Прогнозные изменения средних зимних (слева) и летних (справа) температур (сверху) и осадков (снизу) за 2021–2030 гг. с по сравнению с 2001–2015 гг.

Fig. 3. Predicted change in the mean winter (left) and summer (right) air temperatures (top) and precipitation rates (bottom) from 2001–2015 to 2021–2030

Возможной причиной таких изменений является естественная климатическая изменчивость, т. е. природная цикличность, например, связанная с 19-летним нутационным циклом, когда наблюдается изменение прихода солнечной радиации к земной поверхности во времени и по широтным зонам [25]. На юге исследуемой территории температура воздуха останется практически на уровне современной. Прогнозная сумма атмосферных осадков зимой в третьем десятилетии XXI в. будет заметно выше, чем в начале века.

Летние (июнь–август) температуры воздуха продолжают свой рост, при этом сохранится тенденция более интенсивного их прироста в северной тайге и лесотундре (севернее 62° с.ш.). Средняя величина отклонений температуры лета от климатической нормы на метеостанциях лесотундры достигнет 1,5 °С, а в таежной и лесостепной зоне потепление летнего сезона практически остановится, зафиксировавшись на уровне 2001–2015 гг. Сумма осадков теплого периода года на территории Западно-Сибирской равнины будет показывать разнонаправленные тенденции по направлению с северо-запада на юго-восток. Если на северо-западе равнины будет наблюдаться увеличение осадков, то в юго-восточном секторе – заметное снижение. В средней и южной тайге осадки в 2021–2030 гг. вернутся к уровню 1966–1985 гг. Подчеркнем, что прогнозы выполнены для зимы и лета по каждой из 31 метеостанции, показанной на рис. 1. По результатам такого точечного прогноза были составлены карты-схемы отклонений среднегогодовых атмосферных осадков и температур воздуха за 2021–2030 гг. от среднего уровня 2001–2015 гг. (рис. 3).

Для оценки изменений характеристик водного баланса за внутригодовой период сделаны прогнозы средних на 2021–2030 гг. температур и осадков за каждый месяц с апреля по октябрь, осредненные

по территории результаты приведены на рис. 4. При этом разделение на западную и восточную части Западной Сибири было сделано по той причине, что наблюдается различие в изменении осадков по направлению с запада на восток (в меридиональном направлении), а не как у температуры – в основном с севера на юг (рис. 5).

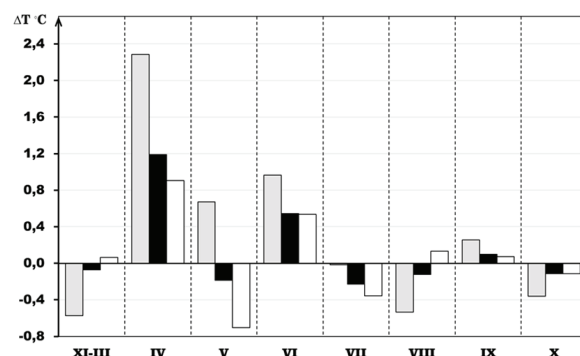


Рис. 4. Прогнозные изменения средних месячных температур воздуха в 2021–2030 гг. по сравнению с 2001–2015 гг. в лесотундре–северной тайге (выделено серым цветом), средней–южной тайге (черным) и южной тайге–лесостепи (белым цветом)

Fig. 4. Predicted change in the mean monthly air temperature from 2001–2015 to 2021–2030: in forest tundra to northern taiga (grey bars), middle to southern taiga (black bars), southern taiga to forest steppe (white bars)

Оценка средних показателей режима осадков, испарения, стока воды и влажности деятельного слоя почвы за внутригодовой период по данным метеостанций за базовый (1966–1985), современный (1986–2015) и прогнозный (2021–2030) периоды. Результаты расчетов и прогнозов месячных и сезонных температур воздуха и атмосферных осадков использовались в качестве входной информации для моделирования водного баланса

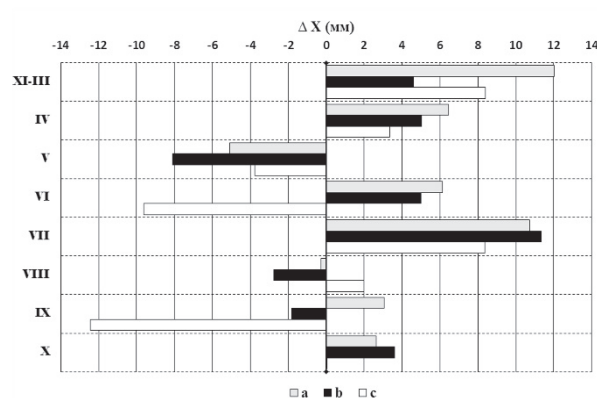


Рис. 5. Прогнозные изменения средних сумм месячных атмосферных осадков в теплую часть года в 2021–2030 гг. с по сравнению с 2001–2015 гг. в лесотундре – северной тайге (выделено серым цветом), средней – южной тайге (черным) и южной тайге – лесостепи (белым цветом): слева – западнее 73° в.д.; справа – восточнее 73° в.д.

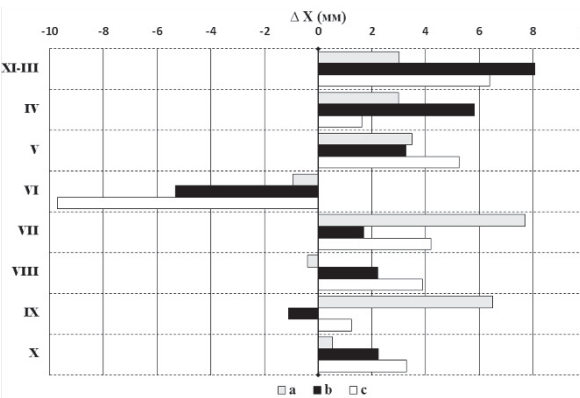


Fig. 5. Predicted change in the mean monthly precipitation rates from 2001–2015 to 2021–2030: in forest tundra to northern taiga (grey bars), middle to southern taiga (black bars), southern taiga to forest steppe (white bars): left – west from 73° E, right – east from 73° E

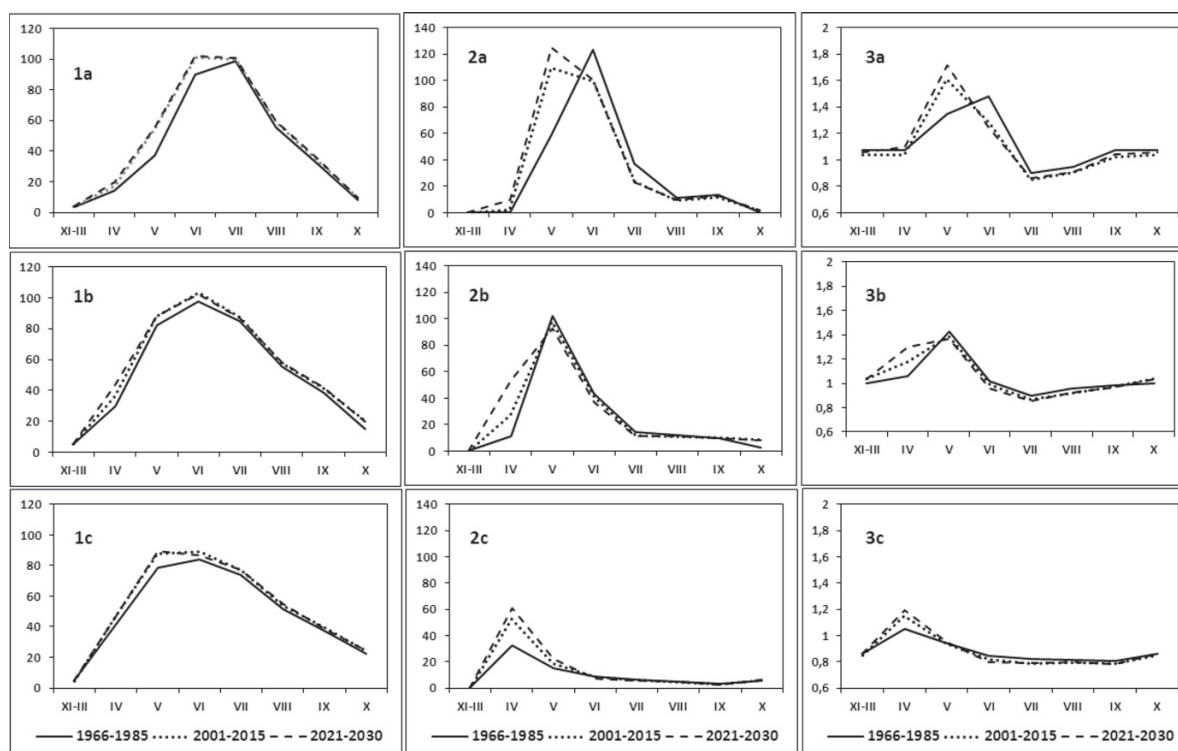


Рис. 6. Внутригодовая изменчивость рассчитанных по метеостанциям слоев испарения (1) (мм), «климатического» слоя стока (2) (мм) и относительной влажности деятельного слоя почвы (3), осредненных по территории трех зональных подразделений и по времени – за базовый, первую половину современного и прогнозный период. а) лесотундра – северная тайга; б) средняя – южная тайга; в) южная тайга – лесостепь

Fig. 6. Inter-annual variations of the calculated at meteorological stations (Fig. 1) evapotranspiration (1) mm, run-off depths (2) mm and relative moisture of soil active layer (3), averaged over territory of three zonal subareas and over time – over the basic, the first half of current and the forecast periods. а) forest tundra to northern taiga; б) middle to southern taiga; в) southern taiga to Forest steppe

(рис. 6). Переход от климатических показателей, полученных согласно конкретным сценариям изменения климата, к гидрологическим характеристикам с помощью моделей баланса тепла и влаги довольно широко используется на практике в нашей стране и за рубежом [26–30].

В данной работе мы используем модель гидролого-климатических расчетов В.С. Мезенцева:

$$Y = H - Z = (X + W_1 - W_2) - Z_M \left[1 + \left(\frac{X + W_1 - W_2}{Z_M} \right)^{-rn} \right]^{\frac{1}{n}},$$

в которой сток Y и испарение Z являются основными воднобалансовыми характеристиками ландшафта. Испарение Z определяется водным эквивалентом теплоэнергетических ресурсов испарения Z_M , суммарным увлажнением деятельной поверхности H , состоящим из суммы исправленных атмосферных осадков X и изменения влажности $(W_1 - W_2)$ деятельного слоя почвы за расчетный месячный период (все перечисленное определяется в мм), а также безразмерными параметрами: n , отражающим влияние ландшафтных условий фор-

мирования стока [31], и r , который характеризует способность почвы подводить воду к испаряющей поверхности и расходовать ее на испарение (зависит от гранулометрического состава грунта и водно-физических характеристик почвы, которые могут меняться в процессе изменения климата).

Величина Z_M вычислялась по сумме месячных температур выше 0°C с учетом затрат тепла на таяние снежного покрова и сезонной мерзлоты, а затем распределялась пропорционально дефициту влажности. Параметры r и n оцениваются в зависимости от определяющих их факторов и уточняются в процессе калибровки модели по величине стока воды с малых экспериментальных бассейнов и влажности деятельного слоя почво-грунта [32–34]. Для выявления роли именно климатических показателей параметры n и r для всех метеостанций принимались одинаковыми: $n=3$ (слабо-дренированная местность); $r=2$ (средний суглинок); $HВ=300$ мм (наименьшая влагоёмкость метрового слоя почвы). Содержание влаги в деятельном слое рассчитывалось с учётом мощностей деятельного слоя, которая определялась с учётом суммы отрицательных температур и высоты снега, вычисляемой по зимним осадкам.

На рис. 6, где показаны результаты модельных расчетов, хорошо фиксируется более раннее начало половодья, определяемое по месяцу перехода среднемесячной температуры воздуха через ноль весной, в лесотундре и тайге. За счёт увеличения зимних осадков увеличивается объем половодья и изменяется его форма. Суммарный объем климатического стока возрастает несмотря на рост испарения. Относительная влажность деятельного слоя, характеризующая отношение влагозапаса деятельного слоя к его наименьшей влагоёмкости, заметно увеличивается в весенний период и снижается в летний период. Наиболее заметные изменения прослеживаются между гидроклиматическими характеристиками базового (1966–1985) и прогнозного (2021–2030) периодов.

Заключение

В работе показано, что современный 30-летний климатический период отличается от предыдущего более высоким энергетическим уровнем (температурами воздуха). На этом фоне в некоторые месяцы наблюдались не только восходящие, но и нисходящие тенденции температуры воздуха.

Выполнен прогноз средних приземных температур воздуха и атмосферных осадков на 2021–2030 гг. за зиму и, по месяцам, – за теплый

период года. Эти данные необходимы для прогноза показателей водного баланса, в том числе климатического стока воды по данным метеостанций.

Оценки за базовый и прогнозный периоды позволили рассчитать средние показатели режима осадков, испарения, стока воды и влажности деятельного слоя почвы по данным метеостанций, расположенных в разных природных зонах Западно-Сибирской равнины.

Режим увлажнения территории формируется под воздействием теплоэнергетических ресурсов климата и атмосферных осадков при определенных (в том числе трансформирующихся при изменении климата) ландшафтных особенностях, определяющих пространственно-временное перераспределение стока. По этой причине прогнозируемый рост температуры, а значит и испарения, не приводит к ожидаемому снижению стока даже в южных районах недостаточного увлажнения. В то же время влажность почвы в летний период, согласно расчетам, повсеместно снизится.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14–05–00700 и гранта по Постановлению Правительства РФ № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки РФ № 14B25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заде Г.О., Катаев С.Г., Кусков А.И. Региональные климатические изменения метеорологических полей // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 4. Природно-климатические изменения. – Томск: МП «Раско», 2000. – С. 11–56.
2. Касимов Н.С., Кислов А.В., Бабурин В.Л. Регионы России: локальные последствия глобального потепления // Экология и жизнь. – 2012. – № 8. – С. 72–77.
3. Climate changes in Siberia / Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I., Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.Ch., Korovin G.N., Meshcherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Tchebakova N.M., Vygodskaya N.N. // Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, 2013. – P. 57–109.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Изд-во Росгидромета, 2014. – 1009 с.
5. Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Климат: структура и динамика метеорологических величин на Азиатской территории России за 1975–2012 гг. // География Сибири в начале XXI века. Т. 2. Природа. Глава 4. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2015. – С. 117–137.
6. Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – 108–118.
7. Шерстюков Б.Г., Салугашвили Р.С. Новые тенденции в изменениях климата северного полушария Земли в последнее десятилетие // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. – 2010. – Вып. 175. – С. 43–51.
8. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Особенности наблюдаемых изменений климата на территории Северной Евразии по данным регулярного мониторинга и возможные их факторы // Тр. Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 358. – С. 13–35.
9. Sherstyukov A.B., Sherstyukov B.G. Spatial Features and New Trends in Thermal Conditions of Soil and Depth of its Seasonal Thawing in the Permafrost Zone // Russian Meteorology and Hydrology. – 2015. – V. 40. – № 2. – P. 73–78. DOI: 10.3103/S1068373915020016.
10. Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Yu.V. Variability of atmospheric circulation under climate change in West Siberia in the late 20th – early 21st centuries // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – V. 41. – № 6. – P. 435–438. DOI: 10.3103/S106837391606008X.
11. Mokhov I.I., Semenov V.A. Weather and Climate Anomalies in Russian Regions Related to Global Climate Change // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – V. 41. – № 2. – P. 84–92. DOI: 10.3103/S1068373916020023.
12. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions / V.A. Zemtsov, V.V. Paromov, S.G. Kopysov, A.V. Kouraev, S.V. Negrul // International Journal of Environmental Studies. – 2014. – V. 71. – № 5. – P. 611–617. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2014.942530>.
13. Dynamics of the Irtysh River Floodplain Hydrology and Vegetation in the Pavlodar Region of the Republic of Kazakhstan / M.A. Beysembayeva, V.A. Zemtsov, V.A. Kamkin, K.U. Bazarbekov // Riparian Zones: Characteristics, Management Practices and Ecological Impacts. Ch. 9 / Ed. by O.S. Pokrovsky. – Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, 2016. – P. 211–230.
14. Impact of western Siberia heat wave 2012 on greenhouse gases and trace metal concentration in thaw lakes of discontinuous permafrost zone / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S.P. Kulizhsky, S.N. Vorobiev // Biogeosciences. – 2013. – V. 10. – P. 5349–5365. DOI: 10.5194/bg-10-5349-2013.

15. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. On the Problem of the Global Climate Change // Russian Meteorology and Hydrology. – 2015. – V. 40. – № 9. – P. 629–634. DOI: 10.3103/S1068373915090083.
16. Шерстюков Б.Г. Оценки точности статистической модели изменений климата по данным на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2010. – Вып. 175. – С. 20–32.
17. Hydrological changes: Historical analysis, contemporary status, and future projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier, Yu.M. Polischuk, O.G. Savichev, L.C. Smith, A.V. Chernokulsky // Regional Environmental Changes in Siberia and their Global Consequences / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, 2013. – P. 111–154.
18. Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. – 80 с.
19. Возобновляемые ресурсы теплоэнергообеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик / И.В. Карнацевич, О.В. Мезенцева, Ж.А. Тусупбеков, Г.Г. Бикбулатова. – Омск: Изд-во Омского государственного аграрного университета, 2007. – 268 с.
20. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 07.02.2016).
21. Переведенцев Ю.П., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Современные глобальные и региональные изменения климата // Географический вестник. – 2006. – № 2. – С. 84–96.
22. Global impacts of the 1980s regime shift / P.C. Reid, R.E. Hari, G. Beaugrand, D.M. Livingstone, C. Marty, D. Straile, J. Barichivich, E. Goberville, R. Adrian, Y. Aono, R. Brown, J. Foster, P. Groisman, P. Hélaouët, H.-H. Hsu, R. Kirby, J. Knight, A. Kraberg, J. Li, T.-T. Lo, R.V. Myneni, R.P. North, J.A. Pounds, T. Sparks, R. Stübi, Y. Tian, K.H. Wiltshire, D. Xiao, Z. Zhu // Global Change Biology – 2016. – V. 22. – № 2. – P. 682–703. DOI: 10.1111/gcb.13106.
23. Sá Joaquim. Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R. – Berlin: Springer, 2007. – 505 p.
24. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
25. Федоров В.М. Пространственные и временные вариации солярного климата Земли в современную эпоху // Геофизические процессы и биосфера. – 2015. – Т. 14. – № 1. – С. 5–22.
26. Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии / А.В. Кислов, В.И. Гребенец, В.М. Евстигнеев, В.Н. Конищев, М.В. Сидорова, Г.В. Суркова, Н.В. Тумель // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2011. – № 3. – С. 3–8.
27. Водный баланс заболоченных водосборных территорий Западной Сибири (на примере малой реки Ключ, Томская область) / О.Г. Савичев, А.А. Скугарев, В.А. Базанов, Ю.А. Харанжевская // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 39–46.
28. Roderick M.L., Farquhar G.D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties // Water Resour. Res. – 2011. V. 47. – W00G07. – 11 p. DOI: 10.1029/2010WR009826.
29. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield / G. Zhou, X. Wei, X. Chen, P. Zhou, X. Liu, Yi. Xiao, G. Sun, D.F. Scott, Sh. Zhou, L. Han, Y. Su // Nature Communications. – 2015. – V. 6. – Article number 5918. – 9 p. DOI: 10.1038/ncomms6918.
30. A two-parameter Budyko function to represent conditions under which evapotranspiration exceeds precipitation / P. Greve, L. Gudmundsson, B., Orłowsky S.I. Seneviratne // Hydrology and Earth System Sciences. – 2016. – V. 20. – P. 2195–2205. DOI: 10.5194/hess-20-2195-2016.
31. Копысов С.Г. Параметрический учёт ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчётов // География и природные ресурсы. – 2014. – № 3. – С. 157–161.
32. Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemstov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // International Journal of Environmental Studies. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 380–385. DOI: 10.1080/00207233.2015.1010876.
33. Копысов С.Г. Расчет элементов водного баланса гидроморфных ландшафтов по водно-физическим свойствам почвенного покрова // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – № 1. – С. 26–30.
34. Копысов С.Г., Ярлыков Р.В. Опыт организации гидролого-климатических наблюдений на малых модельных водосборах Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 115–121.

Поступила 28.12.2016 г.

Информация об авторах

Паромов В.В., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Земцов В.А., доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Копысов С.Г., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета; старший научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

UDC 551.583:556.013

CLIMATE OF WEST SIBERIA DURING THE SLOWING PHASE OF WARMING (1986–2015) AND PREDICTION OF HYDRO-CLIMATIC RESOURCES FOR 2021–2030

Vladimir V. Paromov¹,

pvv0266@mail.ru

Valery A. Zemtsov¹,

zemtsov_v@mail.ru

Sergey G. Kopysov^{1,2},

wosypok@mail.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Institute of monitoring climatic conditions and ecological systems SB RAS,
10/3, Akademicheskoy prospect, Tomsk, 634055, Russia.

The relevance of the study. The most visible affect of the present climate change is the rise of surface air temperature. Regional and local indicators of climate change differ from the global characteristics. Transformation of the hydrological cycle, water balance, river runoff in its turn affects climate processes. In order to predict the response of geosystems and their hydro-climatic resources to climate change it is necessary to have a clear vision of contemporary climate change and its projections for the coming decades in specific geographical localities.

The aim of the study is (1) to assess the climate change over West Siberia on the basis of statistical analysis of monthly air temperature and precipitation time series up to 2015, (2) predict the average air temperature and precipitation fields for the 2021–2030, and (3) determine the climate-driven changes in water balance and water flow regime over the study area.

The methods used in the study. Analysis and forecasting of spatial and temporal variability of surface air temperature and precipitation rates at meteorological stations in the region are made by statistical methods in the StatSoft STATISTICA package (regression analysis, trend analysis, cluster analysis to classify objects, exponential smoothing and forecasting). The averaged monthly land water balance constituents are determined for the base (1966–1985), current (1986–2015) and forecast (2021–2030) using the method of hydrological and climatological calculations developed by V.S. Mezentsev.

The results. It is shown that the modern 30yrs climatic period differs from the previous one in higher energy level (air temperature). Against this background, not only upward but downward temperature trends in some months are observed. The authors have predicted the average temperatures and precipitation rates in a cold season and monthly temperatures and precipitation in a warm season of the year at 31 meteorological stations for 2021–2030. The estimates for the current and forecast periods made it possible to compute the average regime parameters of precipitation, evapotranspiration, runoff and moisture of soil active layer at the meteorological stations located in different landscape zones and regions of West Siberian plain. The projected increase in temperature and evapotranspiration does not lead to the expected decrease in flow even in the southern dry regions. At the same time, soil moisture in summer will decrease everywhere.

Key words:

Hydro-climatic resources of geosystems, water balance, Western Siberia, method of hydrological and climatological computations, air temperature, atmospheric precipitation, time series analysis and forecasting

The research was financially supported by the RFBR grant 14–05–00700 and the grant by order of the Government of the RF no. 220, 09 April 2010, by the agreement with the Ministry of Education and Science of the RF no. 14B25.31.0001, 24 June 2013 (BIO-GEO-CLIM).

REFERENCES

1. Zaddé G.O., Katayev S.G., Kuskov A.I. Regionalnyye klimaticheskiye izmeneniya meteorologicheskikh poley [Regional climate change of meteorological fields]. *Regionalny monitoring atmosfery. Ch. 4. Prirodno-klimaticheskkiye izmeneniya* [regional monitoring of atmosphere. P. 4. Natural climatic changes]. Tomsk, MGP Rasko, 2000. pp. 11–56.
2. Kasimov N.S., Kislov A.V., Baburin V.L. Regiony Rossii: lokalnye posledstviya globalnogo potepleniya [Regions of Russia: local consequences of global warming]. *Ecologia i zhizn*, 2012, no. 8, pp. 72–77.
3. Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I., Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.Ch., Korovin G.N., Meshcherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Tchebakova N.M., Vygodskaya N.N. Climate changes in Siberia. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer Environmental Science and Engineering, Springer, 2013. pp. 57–109.
4. *Vtoroy otsenochny doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [The second assessment report of Roshydromet on climate changes and their effects on the territory of the Russian Federation]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2014. 1009 p.
5. Ippolitov I.I., Loginov S.V., Kharyutkina E.V. Klimat: struktura i dinamika meteorologicheskikh velichin na Aziatskoy territorii Rossii za 1975–2012 gg. [Climate: structure and dynamics of meteorological characteristics on Asian territory of Russia]. *Geografiya Sibiri v nachale XXI veka. T. 2. Priroda. Glava 4* [Geography of Siberia in the beginning of the 21st century. V. 2. Nature. Ch. 4]. Novosibirsk, Geo Academic Publ., 2015. pp. 117–137.

6. Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. Climatic features and statistical evaluation of climate change in permafrost regions in the north of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 108–118. In Rus.
7. Sherstyukov B.G., Salugashvili R.S. Novye tendentsii v izmeneniyakh klimata severnogo polushariya Zemli v poslednee desyatiletie [New tendencies in climate changes of the northern hemisphere of the Earth in the last decade]. *Trudy VNIIGMI-MTsD*, 2010, no. 175, pp. 43–51.
8. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Features of the observed climate changes over the territory of Northern Eurasia according to regular monitoring and their possible factors. *Trudy Gidromettsentra Rossii*, 2015, no. 358, pp. 13–35. In Rus.
9. Sherstyukov A.B., Sherstyukov B.G. Spatial Features and New Trends in Thermal Conditions of Soil and Depth of its Seasonal Thawing in the Permafrost Zone. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 2, pp. 73–78. DOI: 10.3103/S1068373915020016.
10. Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Yu.V. Variability of atmospheric circulation under climate change in West Siberia in the late 20th – early 21st centuries. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41, No. 6, pp. 435–438. DOI: 10.3103/S106837391606008X.
11. Mokhov I.I., Semenov V. A. Weather and Climate Anomalies in Russian Regions Related to Global Climate Change. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 2, pp. 84–92. DOI: 10.3103/S1068373916020023.
12. Zemtsov V.A., Paromov V.V., Kopysov S.G., Kouraev A.V., Negrul S.V. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions. *International Journal of Environmental Studies*, 2014, vol. 71, no. 5, pp. 611–617. DOI: 10.1080/00207233.2014.942530.
13. Beysembayeva M.A., Zemtsov V.A., Kamkin V.A., Bazarbekov K.U. Dynamics of the Irtysh River Floodplain Hydrology and Vegetation in the Pavlodar Region of the Republic of Kazakhstan. *Riparian Zones: Characteristics, Management Practices and Ecological Impacts*. Ch. 9. Ed. by O.S. Pokrovsky. Hauppauge NY, USA, Nova Science Publishers, 2016. pp. 211–230.
14. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Kulizhsky S.P., Vorobiev S.N. Impact of western Siberia heat wave 2012 on greenhouse gases and trace metal concentration in thaw lakes of discontinuous permafrost zone. *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, pp. 5349–5365. DOI: 10.5194/bg-10-5349-2013.
15. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. On the Problem of the Global Climate Change. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 629–634. DOI: 10.3103/S1068373915090083.
16. Sherstyukov A.B. Otsenki tochnosti statisticheskoy modeli izmeneniy klimata po dannym na territorii Rossii [Estimates of the accuracy of the statistical model of climate change based on the data in the territory of Russia]. *Trudy VNIIGMI-MTsD*, 2010, no. 175, pp. 20–32.
17. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.C., Chernokulsky A.V. Hydrological changes: historical analysis, contemporary status, and future projections. *Regional Environmental Changes in Siberia and their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Guttman. Dordrecht, Springer Environmental Science and Engineering, 2013. pp. 111–154.
18. Mezentsev V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselyakh* [Hydrological calculations for amelioration]. Omsk, Omsk Agricultural Institute Publ., 1982. 80 p.
19. Karnatsevich I.V., Mezentseva O.V., Tusupbekov G.A., Bikbulatova G.G. *Vozobnovlyayemye resursy teplolagoobespechennosti Zapadno-Sibirskoy ravniny i dinamika ikh kharakteristik* [Study of the dynamics and mapping of elements of energy and water balance and characteristics of energy and water availability]. Omsk, Omsk State Agricultural University Press, 2007. 268 p.
20. *Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii – Mirovyy tsentr dannykh. Dostup k dannym* [Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Data access]. Available at: <http://meteo.ru/data> (accessed 07 February 2016).
21. Perevedentsev Yu.P., Naumov E.P., Shantalinskiy K.M. Sovremennyye globalnyye i regionalnyye izmeneniya klimata [Modern global and regional climate change]. *Geograficheskiy vestnik*, 2006, no. 2, pp. 84–96.
22. Reid P.C., Hari R.E. Beaugrand G., Livingstone D.M., Marty C., Straile D., Barichivich J., Goberville E., Adrian R., Aono Y., Brown R., Foster J., Groisman P., H elou et P., Hsu H.-H., Kirby R., Knight J., Kraberg A., Li J., Lo T.-T., Myneni R.B., North R.P., Pounds J.A., Sparks T., St ubi R., Tian Y., Wiltshire K.H., Xiao D., Zhu Z. Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology*, 2016, vol. 22, pp. 682–703. DOI: 10.1111/gcb.13106.
23. S a Joaquim. *Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R*. Berlin, Springer, 2007. 505 p.
24. Lukashin Yu.P. *Adaptivnyye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov* [Adaptive methods of short-term time series forecasting]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2003. 416 p.
25. Fedorov V.M. Spatial and temporal variations of the Earth's solar climate in the modern era. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*, 2015, v. 14, no 1, pp. 5–22. In Rus.
26. Kislov A.V., Grebenets V.I., Evstigneev V.M., Konishchev V.N., Sidorova M.V., Surkova G.V., Tumel N.V. Effects of possible climate warming in the 21st century for Northern Eurasia. *Bulletin of Moscow University. 5. Geography*, 2011, no. 3, pp. 3–8. In Rus.
27. Savichev O.G., Skugarev A.A., Bazanov V.A., Kharanzhevskaya Yu.A. Water balance of swamped catchment areas of Western Siberia (an example of small river Kluch, Tomsk region). *Geoinformatica*, 2011, no. 3. pp. 39–46. In Rus.
28. Roderick M.L., Farquhar G.D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties. *Water Resour. Res.*, 2011, vol. 47, W00G07, 11 p. DOI:10.1029/2010WR009826.
29. Zhou G., Wei X., Chen X., Zhou P., Liu X., Xiao Yi., Sun G., Scott D.F., Zhou Sh., Han L., Su Y. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, Article number 5918, 9 p. DOI: 10.1038/ncomms6918.
30. Greve P., Gudmundsson L., Orlowsky B., Seneviratne S.I. A two-parameter Budyko function to represent conditions under which evapotranspiration exceeds precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, vol. 20, pp. 2195–2205. DOI: 10.5194/hess-20-2195-2016.
31. Kopysov S.G. Parametric account of landscape conditions of flow in the method of hydrology-climatic calculations. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 2014, no 3, pp. 157–161. In Rus.
32. Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemtsov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 380–385. DOI: 10.1080/00207233.2015.1010876.
33. Kopysov S.G. Evaluating Water Balance Elements for Hydro-morphic Landscapes by Hydrophysical Properties of Soil Cover. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 1, pp. 23–27. DOI: 10.1134/S0097807815010066. In Rus.
34. Kopysov S.G., Yarlykov R.V. Experience in organization of hydrological and climatic observations on small model catchments of West Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 115–121. In Rus.

Received: 28 December 2016.

Information about the authors

Vladimir V. Paromov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Valery A. Zemtsov, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk State University.

Sergey G. Kopysov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University; senior researcher Institute of monitoring climatic conditions and ecological systems SB RAS.

УДК 552.321.6

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАМАФИТОВ КИРЕЛЬСКОГО ФРАГМЕНТА КАНСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА (СЗ ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Чернышов Алексей Иванович¹,
aich@ggf.tsu.ru

Бабинцев Никита Анатольевич²,
mas9915@mail.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович³,
v_g_v@tpru.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья,
Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 55.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Ультрамафиты изучаемой территории являются перспективными на обнаружение Cu-Ni месторождений с попутными элементами платиновой группы, что обуславливает актуальность их исследования.

Цель работы. Петрологические исследования были направлены главным образом на установление формационной принадлежности ультрамафитов Кулибинской площади, выделение основных петрографических разновидностей и выявление потенциально рудоносных типов пород.

Методы исследования. Детальное петрографическое изучение ультрамафитов проводилось на поляризационном микроскопе AxioScop 40 фирмы Carl Zeiss, что позволило выявить их основные разновидности и по структурным особенностям определить их формационную принадлежность. Изучение вещественного состава минералов и пород проводилось в основном в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» при Томском государственном университете. Оценка химического состава породообразующих минералов проведена на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700. Содержание редких и редкоземельных элементов определялось методом ICP MS на спектрометре серии Agilent 7500. Валовый химический состав пород определялся количественным химическим анализом в лаборатории Минусинской ГРЭ (г. Минусинск).

Результаты. Установлено, что ультрамафиты на исследуемой территории относятся к двум формационным типам и объединяются в два комплекса: кингашский магматический дунит-верлит-пикритовый и идарский реститовый дунит-гарцбургитовый. Наибольший практический интерес представляют ультрамафиты кингашского комплекса, слагающие тела гипабиссальной и субвулканической фации. Они представлены дунитами, верлитами, их серпентинизированными разновидностями и разнообразными по составу пикритами, которые являются производными единой первичной высокомагнезиальной пикритовой магмы. Для них характерны кумулятивные либо порфиоровые структуры. Они обнаруживают непрерывный тренд вариации химического состава минералов, который отражает последовательную магматическую дифференциацию исходного высокомагнезиального пикритового расплава. Установлено, что рудные компоненты обособляются главным образом в интерстициях либо основной массе. Наиболее благоприятными для оруденения являются кумулятивные дуниты и их серпентинизированные разновидности, которыми сложен главным образом рудовмещающий Кингашский массив. Последующие, более дифференцированные, породы обеднены ценными компонентами. Реститовые ультрамафиты представлены породами дунит-гарцбургитовой ассоциации с характерными метаморфическими гранобластовыми структурами. Они отличаются более однородным высокомагнезиальным химическим составом минералов, обусловленным интенсивным деплетированием исходного мантийного субстрата.

Ключевые слова:

Петрология, магматические и реститовые ультрамафиты, дуниты, гарцбургиты, верлиты, пикриты, оливин, пироксены, хромшпинелиды.

В зеленокаменных поясах Канского блока, локализованного в северо-западной части Восточного Саяна, среди метаморфизованных осадочно-вулканических образований, значительным распространением пользуются мелкие тела ультрамафитов (рис. 1). При этом наличие зеленокаменных поясов указывает на возможность обнаружения в них магматических сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений [1–4]. Поэтому ультрамафиты являлись объектом изучения мно-

гих исследователей в связи с их потенциальной рудоносностью на медно-никелевое и благороднометалльное оруденение [5–10].

Проведенные нами ранее детальными петрологическими исследованиями Канского рудного узла (КРУ) позволили объединить ультрамафиты в два комплекса: кингашский магматический дунит-верлит-пикритовый и идарский реститовый дунит-гарцбургитовый [9]. Магматические ультрамафиты по своему составу близки породам Кингашского

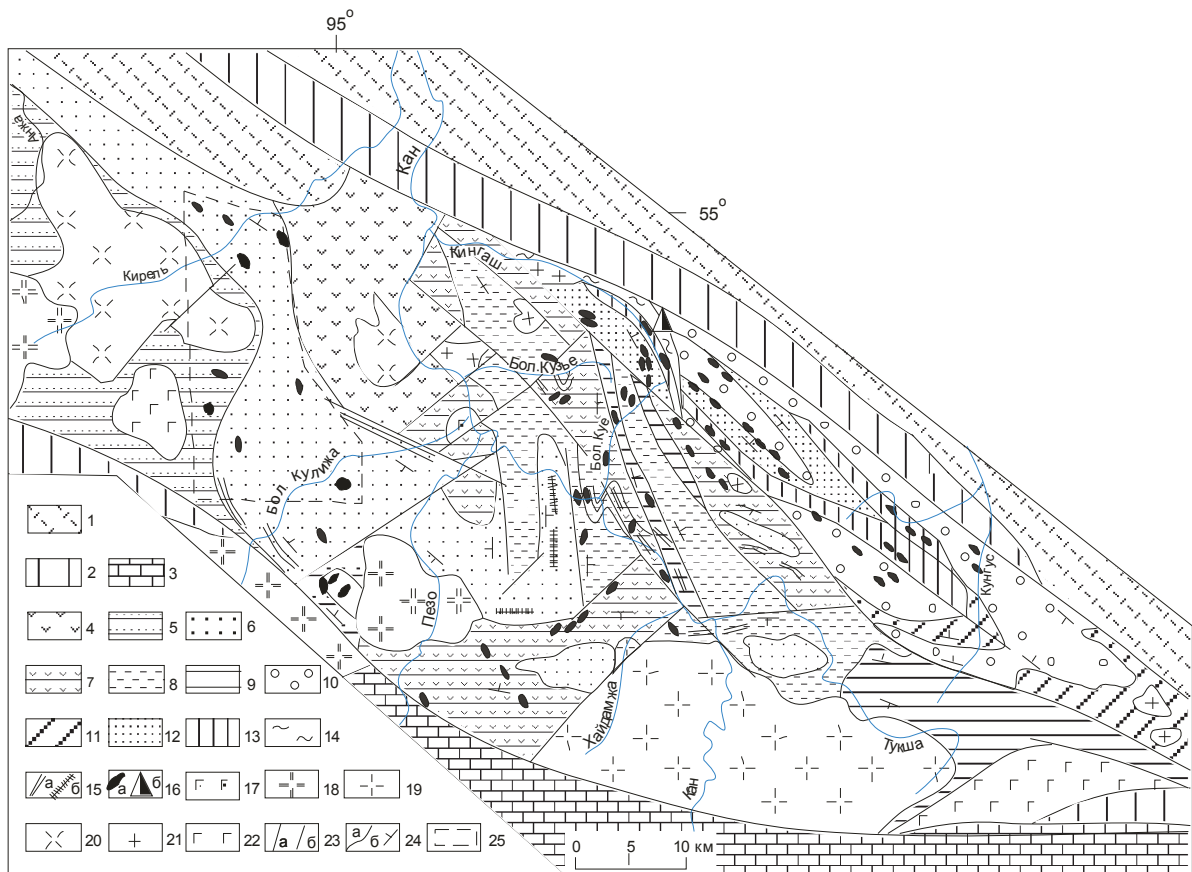


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Канской гранит-зеленокаменной провинции. Составлена А.Д. Ножкиным, О.М. Туркиной по результатам личных тематических исследований (80–90-е гг.) и интерпретации материалов крупномасштабной геологической съемки Красноярского геологического управления. 1 – осадочно-вулканогенные образования девона (Рыбинская впадина); 2 – вулканогенно-осадочные отложения позднего рифея – кембрия; 3 – метатерригенно-карбонатные комплексы протерозоя; 4–5 – позднерифейские метаморфические гнейсово-амфиболитовые комплексы: 4 – Шумихинского террейна, 5 – Кирельского ареала; 6–15 – метаморфические толщи зеленокаменных поясов раннего протерозоя: 6 – биотитовых и гранат-биотитовых парагнейсов, 7 – гнейсово-амфиболитовая (дацит-базальтовая), 8 – биотитовых и амфиболовых ортогнейсов (андезит-дацит-риодацитовая), 9 – амфиболитовая (пикробазальт-базальтовая); 10 – гранатсодержащих амфиболовых и биотитовых парагнейсов (граувакковая), 11 – полевошпатовых амфиболитов (лейкобазальт-андезитбазальтовая), 12 – гранатсодержащих биотитовых парагнейсов (терригенная) и амфиболитов, 13 – амфиболитовая с горизонтами тремолит-серпентиновых сланцев (коматит-базальтовая), 14 – мигматит-гнейсовая; 15 – маркирующие горизонты: а) мраморов, б) кварцитов; 16 – тела ультрамафитов (вне масштаба) (а); треугольником обозначено положение Кингашского рудоносного массива (б). 17–22 – интрузивные комплексы: 17 – палеозойский габброидный, 18 – ордовикский лейкогранит-гранитовый, 19 – вендский трондьемитовый (Верхнеканский массив), 20 – верхнерифейский тоналит-трондьемитовый (Шумихинский и Кирельский массивы), 21 – позднерифейский плагиогранит-гранитовый (Кузьинский массив), 22 – раннепротерозойский габбровый; 23 – тектонические границы: а) региональные разломы, б) прочие, 24 а) геологические границы, б) элементы залегания толщ, 25 – исследуемая Кулибинская площадь

Fig. 1. Schematic geological map of Kansk granitic-greenstone province composed by A.D. Nozhkin, O.M. Turkina by the results of personal studies (80–90-s) and interpretation of large-scale geological mapping materials realized by Krasnoyarsk geological survey. 1 are the volcanosedimentary devonian formations (Rybinskaya hollow), 2 are the volcanosedimentary late-riplean-cambrian deposits, 3 are the metaterrigen-carbonaceous proterozoic complexes, 4, 5 are the late-riplean metamorphic gneiss-amphibolitic complexes: 4 – Shumikhinskiy terrane, 5 – Kirelskiy areal; 6–15 are the metamorphic series of early-proterozoic greenstone belts: 6 – biotitic and garnet-biotite paragneisses, 7 – gneiss-amphibolitic (dacit-basaltic), 8 – biotitic and amphibolitic orthogneisses, 9 – amphibolitic (picrobasalt-basaltic), 10 – garnetiferous amphibolitic and biotite paragneisses (greywacke), 11 – feldspathic amphibolites (leicobasalt-andesytbasaltic), 12 – garnetiferous biotitic paragneisses (terrigenic) and amphibolitic, 13 – amphibolitic with beds of tremolite-serpentinic schists, 14 – migmatite-gneissic, 15 – reference horizons: a) marble b) quartzite; 16 are the ultramafit bodies (out of scale) (a); position of the Kingashsk ore-bearing massif designated with the triangle (b). 17–22 are the intrusive complexes: 17 – Paleozoic gabbroic, 18 – ordovician leicogranite-granitic, 19 – vendian trondhjemitic (Verkhnekansk massif), 20 – upper-riplean tonalite-trondhjemitic (Shumikhinsk and Kirelsk massifs), 21 – late-riplean plagiogranite-granitic (Kuzinsk massif), 22 – early-proterozoic gabbroic; 23 are the tectonic borders: a) regional, b) others, 24 a) geological borders, b) attitude elements, 25 is the studied Kulibinskaya area

массива, который представляется эталонным объектом для этого комплекса и является рудовмещающим для одноименного платиноидно-медно-никелевого месторождения [7, 11]. Исследуемая Кулибинская площадь является Кирельским фрагментом Канского зеленокаменного пояса (ЗКП) [12]. В его пределах установлено свыше 50 малых тел ультрамафитов, формационная принадлежность которых остается спорной. В них отмечалась сульфидная минерализация, что позволяет относить их к потенциально рудоносным.

Целью данной работы является минералого-петрографическая типизация ультрамафитов исследуемой площади с целью оценки их перспектив на обнаружение Cu-Ni и благороднометаллового (ЭПГ) оруденения. Изучаемая территория, так же как и сопряженный Кингашский рудный узел [7], характеризуется значительным распространением ультрамафитов как идарского реститового, так и кингашского магматического комплексов, породы которых часто макроскопически неотличимы. Исследования направлены на выделение пород кингашского комплекса, продуктивного на Cu-Ni оруденение, изучение особенностей их строения и минералогического состава. Проведено сравнение ультрамафитов кингашского и идарского комплексов с аналогичными образованиями Кингашского рудного узла [6, 9].

Петрографическая характеристика пород

Ультрамафиты по минералогическим и структурным особенностям на изучаемой площади подразделяются на две большие группы, соответствующие магматическому кингашскому и реститовому идарскому комплексам [9].

Магматические ультрамафиты кингашского комплекса

Ультрамафиты кингашского комплекса представлены породами дунит-верлит-пикритовой ассоциации, включающей дуниты, верлиты, клинопироксениты и метапикриты. Эти породы характеризуются наличием отчетливо выраженных кумулятивных и порфириновых структур, свидетельствующих о небольшой глубине их образования [9]. Кумулятивную фазу и порфириновые вкрапленники слагают субизометричные и гипидиоморфные зерна оливина, реже зерна клинопироксена. Интеркумулятивную фазу в этих породах выполняют обычно тремолит и хлорит.

Дуниты имеют среднезернистую, кумулятивную структуру (рис. 2, а), нередко осложненную катаклизмом. Часто хорошо проявляется наложенная петельчатая. Текстура однородная, нередко сланцеватая. Породы на 65–75 % сложены серпентинизированным оливином. Хлорит, тремолит и кальцит слагают ~20–30 % от объема породы, до 5 % отмечается магнетит. Оливин наблюдается в виде субизометричных кумулятивных зерен размером 2–3 мм, наиболее крупные индивиды более 3 мм представляют порфирировидные вкрапленники.

Интерстиции выполнены главным образом микрозернистыми агрегатами хлорит-тремолитового состава, часто с примесью магнетита и кальцита. Тремолит и хлорит нередко образуют сланцеватый матрикс, который плавно огибает кумулятивные зерна оливина и придает им форму будин. Магнетит обычно обильно насыщает породу в виде тонкой вкрапленности, просечек, мелких ветвящихся жилок. Его агрегативные скопления имеют неправильную форму и нередко подчеркивают кумулятивную структуру. Отмечаются более крупные индивиды магнетита до 1 мм, которые, вероятно, образовались за счет исходных зерен хромшпинелида.

В аподунитовых серпентинитах обычно сохраняется кумулятивная структура. Они имеют лизардитовый либо антитигрит-лизардитовый состав. Только в интенсивно перекристаллизованных антитигритовых разностях кумулятивная структура полностью уничтожена. Оливин в серпентинитах обычно полностью псевдоморфно замещен серпентином и редко сохраняются в виде реликтов мелких зерен. Интеркумулятивная фаза представлена тремолит-хлоритовыми микрозернистыми агрегатами, с различными количественными вариациями минералов, вплоть до мономинеральных.

Верлиты. Их структура от микро- до среднезернистой, кумулятивная (рис. 2, б). Текстура верлитов обычно однородная, иногда в них отмечается слабо выраженная сланцеватость. Минералогический состав: оливин – до 50 %, клинопироксен ~15 %, тремолит ~15 %, хлорит ~15 %, магнетит до 5 %. Кумулятивные зерна представлены оливином и клинопироксеном, с преобладанием первого. Зерна оливина наблюдаются в виде агрегативных обособлений, их размер до 4 мм. Они интенсивно замещаются лизардитом, вплоть до образования полных псевдоморфоз. Степень серпентинизации зерен оливина варьирует в широких пределах от 15 до 60 %, редко до 100 %. Кумулятивные зерна клинопироксена встречаются реже, их размер 1,5–2,5 мм, отмечается замещение тремолитом и хлоритом. Интерстиции выполнены хлорит-тремолитовыми агрегатами с различными количественными вариациями, вплоть до мономинеральных. Они иногда имеют сланцеватый облик и огибают кумулятивные зерна оливина и клинопироксена. В породе отмечается обильная вкрапленность магнетита в виде просечек, ветвящихся жилок, мелкой и тонкой вкрапленности.

Клинопироксениты. Структура пород преимущественно тонкозернистая, иногда грубозернистая, панидиоморфная с участками сидеронитовой (рис. 2, в), встречается пойкилитовая, текстура однородная. Состав породы: клинопироксен ~80–90 %, флогопит ~10 %, апатит до 10 %, магнетит до 10 %. В грубозернистых разностях клинопироксен представлен крупными зернами с размером до 10 мм и более. В тонкозернистых размер зерен составляет 0,5–1 мм. Форма зерен субизометричная, таблитчатая. Флогопит наблюдается в виде многочисленных мелких чешуек (0,5–1 мм),

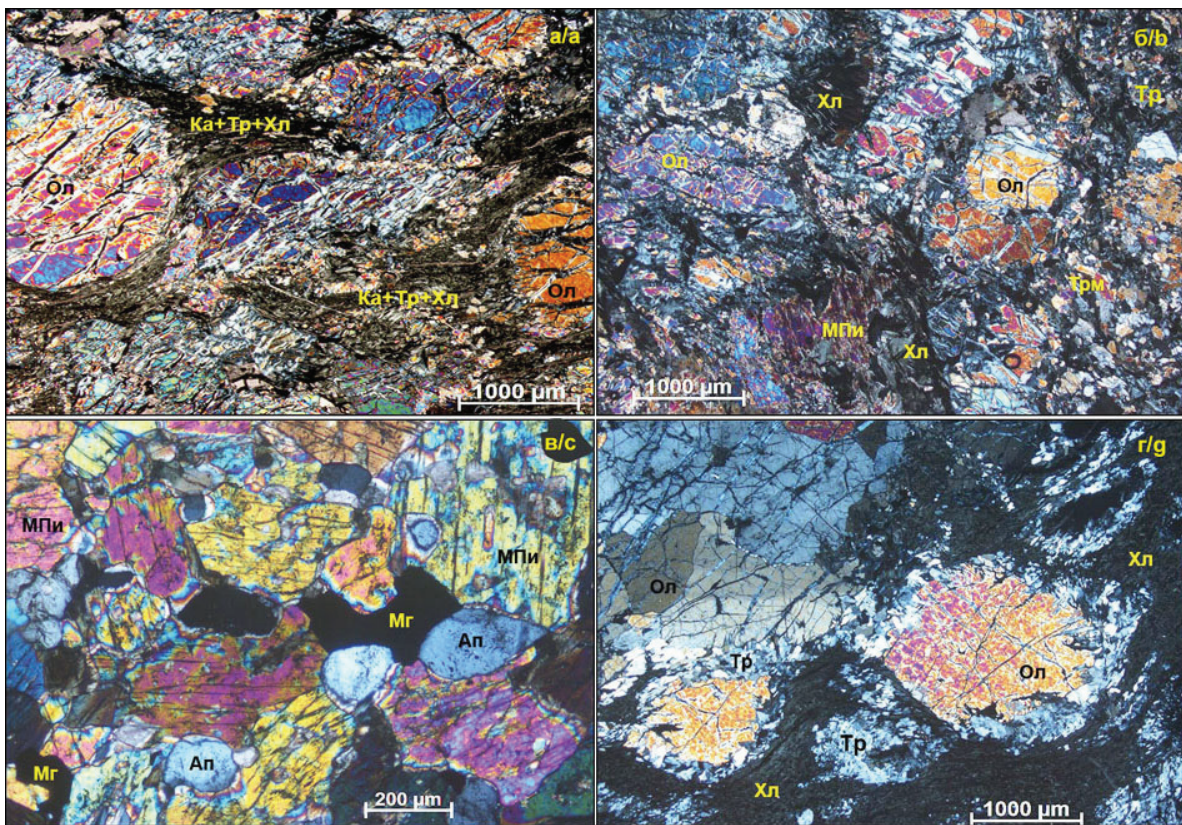


Рис. 2. Магматические ультрамафиты кингашского комплекса: а) дунит (обр. С14/30–32), б) верлит (обр. 1032), в) клинопироксенит (обр. С14/12–33), г) оливиновый пикрит (обр. 47). Ол – оливин, МПи – клинопироксен, Тр – тремолит, Хл – хлорит, Ка – кальцит, Ап – апатит, Мг – магнетит. Николи X

Fig 2. Magmatic ultramafites of kingashsk complex: a) dunite (s. C14/30–32), b) verlite (s. 1032), c) clinopyroxenite (s. C14/12–33), g) olivine-picrite (s. 47). Ол – olivine, МПи – clinopyroxene, Тр – tremolite, Хл – chlorite, Ка – calcite, Ап – apatite, Мг – magnetite. Nicols X

часто в виде пойкилитовых включений в зернах клинопироксена. Чешуйки флогопита также обособляются по границам зерен клинопироксена. Отмечается апатит виде мелких округлых, эллипсоидальных зерен с размерами ~0,5 мм. Агрегативные обособления магнетита цементируют зерна клинопироксена и апатита.

Метапикриты отличаются от кумулятивных дунитов и верлитов меньшим количеством вкрапленников оливина и клинопироксена, их содержание обычно менее 50 % от объема породы (рис. 2, г). Для них характерны преимущественно blastoporphiroвые и порфирокластовые структуры. По составу вкрапленников выделяются оливиновые и пироксеновые метапикриты, редко оливин-пироксеновые. Метапикриты претерпели интенсивные преобразования, порфиромы в них замещаются вторичными минералами, нередко полностью. Исходные оливиновые вкрапленники представлены субизометричными и неправильными по форме зернами с округлыми и плавными границами, которые иногда образуют гломеробластовые скопления, в порфирокластовых и милонитизированных породах зерна оливина наблюдаются в виде удлиненных порфи-

клат, имеющих форму будин. В интенсивно измененных породах порфиромы вкрапленники оливина обычно полностью замещаются пятнистыми агрегатами серпентина антигорит-лизардитового состава. Исходные клинопироксеновые вкрапленники часто псевдоморфно замещены уралитом, либо тремолитом и наблюдаются в виде порфиробласт, которые нередко дезинтегрированы на отдельные индивиды. Интеркумулусная фаза представлена хлорит-тремолитовыми агрегатами, нередко с хорошо выраженной сланцеватостью. Магнетит приурочен к вкрапленникам оливина и наблюдается в виде просечек в жилках лизардита либо образует тонкую вкрапленность. Основная цементирующая масса неравномерно, однако обычно обильно насыщена тонкой вкрапленностью рудных минералов, размером менее 0,2 мм. Метапикриты нередко милонитизированы.

Метаморфические ультрамафиты идарского комплекса

Ультрамафиты идарского комплекса представлены дунитами, гарцбургитами, ортопироксенитами и образовавшимися по ним серпентинитами. Эти породы являются мантийными реститовыми образованиями, для которых характерно отсут-

ствие магматических кумулятивных микроструктур. Реститовые ультрамафиты были перемещены в верхние этажи литосферы вдоль глубинных надвигов, в результате чего претерпели существенные пластические деформации с образованием гранобластовых, порфирикластовых, мозаичных микроструктур [13–15].

Дуниты свежего облика встречаются редко, обычно они серпентинизированы вплоть до образования серпентинитов. Структура дунитов тонко-, мелкозернистая, мозаичная (рис. 3, а) либо мозаично-лейстовая. Однако отмечаются среднезернистые, мезогранулярные и грубозернистые, протогранулярные (рис. 3, б). Текстура обычно однородная, реже директивная. Порода сложена оливином, в отдельных случаях – до 100 %, присутствует хромшпинелид, из вторичных минералов отмечаются антигорит, лизардит, тремолит, тальк, хлорит, кальцит и магнетит. В тонко-, мелкозернистых дунитах размеры зёрен оливина – 0,2–1 мм, в грубозернистых до 10 мм и более. Оливин часто замещается антигоровыми агрегатами. Отмечается неравномерная вкрапленность зерен хромшпинелидов.

Гарцбургиты редко имеют свежий облик, они обычно серпентинизированы и часто оталькованы (рис. 3, з). Гарцбургиты отличаются широкими вариациями структур по размерам зерен оливина: мозаичные (микрозернистые, тонкозернистые, мелкозернистые), мезогранулярные (среднезернистые), протогранулярные (крупнозернистые, грубозернистые). Структуры обычно гранобластовые, нередко порфиробластовые, иногда порфирикластовые. Текстура однородная, либо директивная. Минералогический состав: оливин ~70–85 %, энстатит ~15–25 %, хромшпинелид до 5 %. Из вторичных минералов отмечаются серпентин, тальк, тремолит, хлорит, кальцит, магнетит. Оливин представлен гранобластовыми агрегатами субизометричных, нередко удлиненных зерен, которые вытягиваются субпараллельно и отражают направление директивности. В пластически деформированных гарцбургитах порфирикласты приобретают неоднородное погасание, иногда отмечаются полосы пластического излома. Они по краям синтетонически рекристаллизованы с образованием мозаичных агрегатов с размерами менее 0,5 мм. В измененных разностях агрегаты лизардита либо

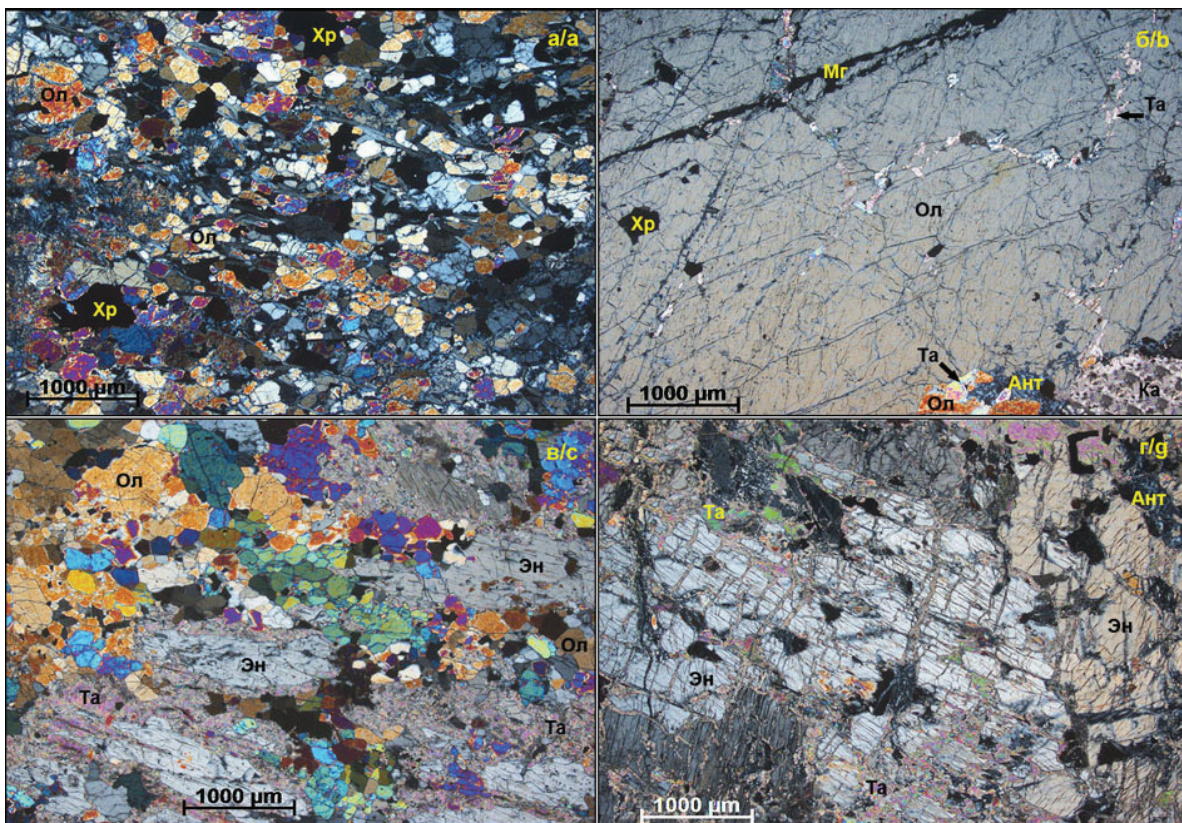


Рис. 3. Реститовые ультрамафиты идарского комплекса: а) дунит мозаичный (обр. 5089), б) дунит протогранулярный (обр. 5126), в) гарцбургит (обр. 4214/1), г) ортопироксенит (обр. 4195). Ол – оливин, Эн – энстатит, Хр – хромшпинелид, Ант – антигорит, Та – тальк, Ка – кальцит. Николи скрещены

Fig. 3. Restite ultramafites of udarsk complex: а) mosaic dunite (s. 5089), б) protogranular dunite (s. 5126), в) harzburgite (s. 4214/1), г) orthopyroxenite (s. 4195). Ол – olivine, Эн – enstatite, Хр – chrome-spinel, Ант – antigorite, Та – talcum, Ка – calcite. Crossed nicols

антигорита полностью замещают исходные зерна оливина. Энстатит наблюдается в виде субизометричных зерен с размерами до 3 мм либо образует порфиробласты до 10 мм. Удлиненные зерна вытягиваются субпараллельно и подчеркивают направление директивности. По трещинкам и периферии зерна энстатита замещаются микрочешуйчатым тальком (рис. 3, з), нередко до полного замещения. Нередко зерна энстатита псевдоморфно замещены баститом (пластинчатым лизардитом). Ксеноморфные зерна хромшпинелидов имеют размеры до 2 мм.

Ортопироксениты сложены энстатитом ~70–80 %, оливином ~10–20 %, хромшпинелидами до 5 % (рис. 3, з). Структура средне-, крупнозернистая, редко мелкозернистая, панидиоморфная, текстура однородная. По первичным минералам развиваются хризотил, антигорит, тальк, хлорит, магнетит. Энстатит образует зерна размерами от 2 до 10 мм, которые замещаются микрочешуйчатыми агрегатами талька. Оливин иногда присутствует в заметных количествах и представлен субизометричными зернами с размерами до 2 мм, нередко полностью замещёнными серпентином. В ортопироксенитах отмечаются субизометричные зерна хромшпинелидов с размерами до 1 мм. Магнетит наблюдается в виде очень тонкой вкрапленности, тонких просечек приуроченных обычно к серпентину и хлориту.

Особенности минералогического состава ультрамафитов

При рассмотрении особенностей минералогического состава ультрамафитов исследуемой территории основное внимание уделялось изучению вещественного состава, главным образом оливинов и хромшпинелидов, в меньшей мере ортопироксенов и клинопироксенов. Основной целью исследования является: 1) установление сходства и отличий в составе минералов ультрамафитов кингашского и идарского комплексов, 2) выявление эволюции состава минералов в породах обоих комплексов, обусловленной как процессами магматической дифференциации, так и деплетирования мантийного субстрата и поздним наложенным метаморфизмом. Проведено сравнение исследуемых минералов с аналогичными минералами в породах Кингашского рудного района и породах офиолитового комплекса [9].

Оливины

Анализ составов оливина в ультрамафитах исследуемой Кулибинской площади показал, что они имеют близкие составы с оливинами из ультрамафитов Кингашского рудного района (табл. 1). При этом оливины в ультрамафитах кингашского комплекса существенно отличаются от оливинов идарского на обеих территориях и образуют на бинарных диаграммах MgO–FeO, MgO–SiO₂ непересекающиеся поля распространения фигуративных точек (рис. 4).

Таблица 1. Средние химические составы оливинов в ультрамафитах (в мас. %)

Table 1. Average chemical compositions of olivines from ultramafites (wt. %)

Порода/Rock	SiO ₂	FeO	MnO	MgO	NiO	Fa
Кулибинская площадь/Kulibinskaya area						
Кингашский комплекс/Kingashsk complex						
Дуниты-1/Dunite-1 (3)	40,53	10,87	н.о	48,45	0,14	11,2
Дуниты-2/Dunite-2 (2)	39,09	19,54	0,72	40,65	н.о	21,2
Верлиты/Verlite (2)	38,57	21,81	0,35	39,29	н.о	23,7
Пикриты/Picrite (2)	39,11	23,87	0,45	36,58	н.о	26,8
Идарский комплекс/Idarsk complex						
Дуниты/Dunite (12)	41,53	6,84	н.о	51,22	0,37	7,0
Гарцбургиты Harzburgite (6)	41,72	6,85	н.о	50,82	0,42	7,0
Ортопироксениты Orthopyroxenite (2)	40,50	10,40	н.о	48,40	0,70	10,7
Кингашский рудный район/Kingashsk ore region						
Кингашский комплекс/Kingashsk complex						
Дуниты/Dunite (5)	39,90	13,91	0,21	45,11	0,27	14,7
Верлиты/Verlite (2)	40,18	17,38	0,33	40,40	0,17	19,4
Пикриты/Picrite (1)	37,59	19,83	0,32	41,07	0,27	21,3
Идарский комплекс/Idarsk complex						
Дуниты/Dunite (2)	40,79	9,01	0,15	49,66	0,39	9,3
Гарцбургиты Harzburgite (2)	41,01	9,15	0,14	49,45	0,45	9,4
ЮВ Восточного Саяна (Оспинский массив) SE of East Sayan (Ospinsk massif)						
Офиолитовый комплекс/Ophiolitic complex						
Дуниты/Dunite (2)	40,91	7,34	0,11	51,11	0,34	7,3
Гарцбургиты Harzburgite (2)	41,20	8,51	0,14	50,13	0,44	8,4

Примечание: в скобках количество измерений, по которым рассчитано среднее. Fa – содержание фаялитовой молекулы [Fa (%)=Fe/(Fe+Mg)×100]. Анализы пород Кингашского рудного района и офиолитового комплекса ЮВ Восточного Саяна (Оспинский массив) заимствованы из работы [9].

Note: number of measurements, used to calculate average value, are in brackets. Fa is the content of fayalite molecule [Fa (%)=Fe/(Fe+Mg)×100]. Analysis of rocks from Kingash ore region and ophiolitic complex of SE of East Sayan (Ospinsk massif) borrowed from [9].

В ультрамафитах **кингашского комплекса** Кулибинской площади отчётливо выделяется две генерации оливина (рис. 4, табл. 1): первая по химическому составу соответствует магнезиальному хризолиту (Fa=11,2 %), вторая – хризолиту (Fa=21,2–26,8 %) [16]. В ряду: дуниты–верлиты–пикриты отчетливо отмечается увеличение железистости оливина, соответственно, (11,2–21,2 %)–23,7 %–26,8 %, что, вероятно, обусловлено возрастанием степени магматической дифференциации исходного высокомагнезиального пикритового расплава. В оливинах постоянно присутствует MnO, его максимальные количества характерны для дунитов (0,69–0,75 %) и уменьшаются к пикритам и затем к верлитам (до 0,33 %). Примесь NiO в оливинах для пород кингашского комплекса на площади не характерна, лишь обнаружена в оливинах дунитов (0,14 %). CaO не был установлен в оливинах изученных пород. Оливины по

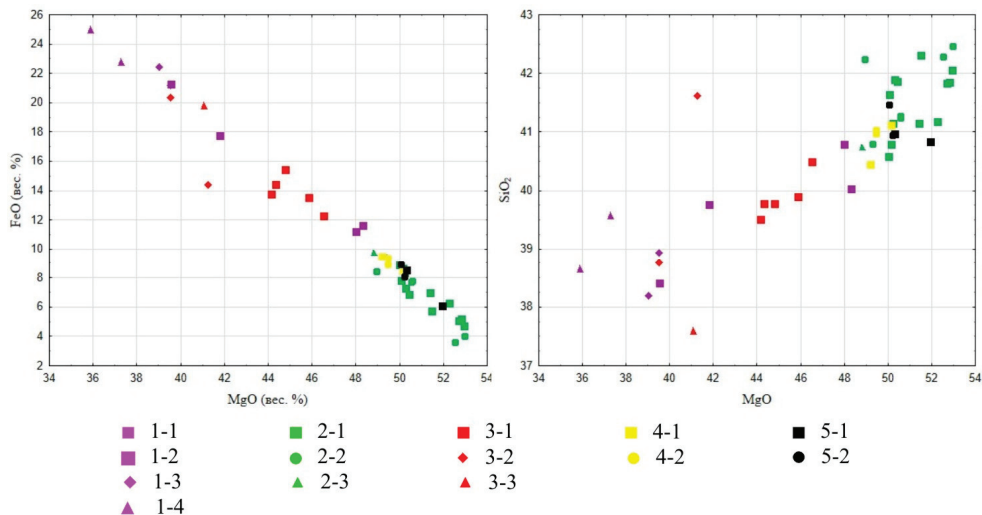


Рис. 4. Составы оливинов в породах кингашского и идарского комплексов Канской глыбы. **1-2 – Кулибинская площадь.** Кингашский комплекс: 1-1 – дуниты-1, 1-2 – дуниты-2, 1-3 – верлиты, 1-4 – пикриты. Идарский комплекс: 2-1 – дуниты, 2-2 – гарцбургиты, 2-3 – ортопироксениты. **3-4 – Кингашский рудный район.** Кингашский комплекс: 3-1 – дуниты, 3-2 – верлиты, 3-3 – пикриты. Идарский комплекс: 4-1 – дуниты, 4-2 – гарцбургит. **5 – ЮВ Восточного Саяна (Оспинский массив).** Офиолитовый комплекс: 5-1 – дуниты, 5-2 – гарцбургиты

Fig. 4. Composition of olivines in the rocks of kingashsk and idarsk complexes of Kansk block. **1-2 – Kulibinskaya area.** Kingashsk complex: 1-1 – dunites-1, 1-2 – dunites-2, 1-3 – verlites, 1-4 – picrites. Idarsk complex: 2-1 – dunites, 2-2 – harzburgites, 2-3 – orthopyroxenites. **3-4 – Kingashsk ore region.** Kingashsk complex: 3-1 – dunites, 3-2 – verlites, 3-3 – picrites. Idarsk complex: 4-1 – dunites, 4-2 – harzburgites. **5 – SE of West Sayan (Ospinsk massif).** Ofiolitic complex: 5-1 – dunites, 5-2 – harzburgites

своему составу обнаруживают сходство с оливинами из аналогичных ультрамафитов Кингашского рудного района [9]. Однако отмечаются отличия, оливины из дунитов Кингашского массива по железистости занимают промежуточное положение между оливинами двух генераций Кулибинской площади. При этом в составах оливина в верлитах и пикритах Кингашского массива отмечается уменьшение железистости и постоянно отмечается присутствие NiO. Дуниты, сложенные оливином первой генерации, являются наиболее ранними дифференциатами, а дуниты, верлиты и пикриты с оливином второй генерации относятся к поздним дифференциатам.

Оливины ультрамафитов *идарского комплекса* Кулибинской площади существенно отличаются от оливинов кингашского комплекса (рис. 4, табл. 1). Они соответствуют форстериту (Fa=7,0 %) [16]. Составы оливина в дунитах и гарцбургитах перекрываются и отвечают форстериту (Fa=4,77–8,06 %), (Fa=3,73–9,71 %), соответственно. В оливиновых ортопироксенитах железистость оливина незначительно возрастает до магнезиального хризолита (Fa=10,07–11,37 %). В отличие от оливинов кингашского комплекса они не содержат MnO и в то же время в них присутствует NiO. По составу оливины из дунитов и гарцбургитов идарского комплекса Кулибинской площади близки оливинам из подобных пород идарского комплекса Кингашского рудного района и Оспинского массива ЮВ Восточного Саяна (рис. 4) [9]. Они отличаются большей вариацией составов оливина и присутствием в них MnO.

Хромшпинелиды

Составы хромшпинелидов в ультрамафитах кингашского и идарского комплексов на Кулибинской площади и в Кингашском рудном районе обнаруживают значительные вариации (табл. 2, рис. 5, 6), которые, очевидно, обусловлены как процессами формирования пород, так и наложенными метаморфическими процессами.

Хромшпинелиды в ультрамафитах *кингашского комплекса* Кулибинской площади интенсивно метаморфизованы до магнетитов (табл. 2, рис. 5), поэтому в них всегда много FeO, при малых содержаниях Cr₂O₃, MgO, Al₂O₃. Практически постоянно отмечаются TiO₂ и MnO, а V₂O₅ и NiO в них отсутствуют. По своему составу они существенно отличаются от хромшпинелидов из пород кингашского комплекса в Кингашском рудном районе (табл. 2), в которых они менее метаморфизованы, поэтому более хромистые, менее железистые и представлены хромпикотитами, субферрихромпикотитами, ферриалюмохромитами, субалюмохромитами, хроммагнетитами (рис. 5) [17]. На бинарных диаграммах фигуративные точки хромшпинелидов кингашского комплекса на обеих территориях образуют самостоятельные не пересекающиеся поля (рис. 6). На Кулибинской площади отмечается отчетливое разделение дунитов на две разновидности: для дунитов-1 первой фазы (с менее железистым оливином) характерен высокохромистый магнетит с примесью до 17,04 % Cr₂O₃. Для дунитов-2 второй фазы (с наиболее железистым оливином) характерен магнетит с низкими содержаниями Cr₂O₃ (менее 10 %). В верлитах и пикритах Ку-

либинской площади встречается магнетит с максимальным содержанием FeO (до 96 %), в котором зачастую отмечаются следы серы. Примесь серы и никеля в отдельных магнетитах, очевидно, свидетельствует об образовании их в результате замещения сульфидов железа, что подтверждается минералогическими исследованиями. Хромшпинелиды из пород кингашского комплекса в Кингашском рудном районе отличаются присутствием и значительной вариацией Al_2O_3 , а также в них нередко содержится V_2O_5 , NiO (табл. 2).

Хромшпинелиды в ультрамафитах *идарского комплекса* Кулибинской площади обнаруживают существенные вариации состава (табл. 2) и представлены ферриалюмохромитами, субальюмоферрихромитами, феррихромитами, хроммагнетитами, магнетитами (рис. 5). В области магнетитов поля составов хромшпинелидов *идарского* и *кингашского* комплексов перекрываются. Для всей совокупности составов хромшпинелидов из пород *идарского* комплекса устанавливается отчетливая прямая корреляция между Cr_2O_3 –MgO и обратная Cr_2O_3 –FeO, что отражает неравномерную степень их наложенного метаморфического преобразования: от незначительной и до полного замещения магнетитом (рис. 6).

Составы хромшпинелидов из ультрамафитов *идарского* комплекса Кулибинской площади и *Кингашского* рудного района существенно отличаются (табл. 2). Последние являются более магнезиальными, глиноземистыми, менее железистыми и представлены пикотитами, субферрихромпикотитами, субферриалюмохромитами (рис. 5). Для них устанавливается прямая корреляция для Cr_2O_3 –FeO и обратная для Cr_2O_3 –MgO (рис. 6). Вариации составов хромшпинелидов из ультрамафитов *идарского* комплекса в *Кингашском* рудном районе и *офиолитового Восточно-Саянского* комплекса, очевидно, обусловлены глубинными процессами неравномерного деплетирования мантийного субстрата. При этом более высокая хромистость хромшпинелидов в ультрамафитах *офиолитового* комплекса, вероятно, обусловлена более высокой степенью деплетирования мантийного вещества. Существенные вариации составов хромшпинелидов, схожие с описанными выше, характерны для пород *мафит-ультрамафитовых* комплексов *Восточного* и *Западного Саяна* [18, 19] и не характерны для аналогичных образований других регионов [20–24].

Ортопироксены

Ортопироксены в дунитах, гарцбургитах и ортопироксенитах *идарского* комплекса Кулибинской площади характеризуются близким химическим составом (табл. 3). Они имеют высокую магнезиальность, низкую железистость и глиноземистость. В них отсутствует Cr_2O_3 . По своему составу ортопироксены соответствуют энстатиту малоглиноземистого типа [25]. Они по своему составу являются очень близкими энстатитам из гарцбургитов *идарского* комплекса *Кингашского* рудного района и *Ос-*

пинского массива. Отличия заключаются в постоянном присутствии в энстатитах сравниваемых комплексов Cr_2O_3 и MnO. Таким образом, состав ортопироксенов в породах *идарского* комплекса свидетельствует о его мантийно-реститовой природе.

Таблица 2. Средние химические составы хромшпинелидов и магнетитов в ультрамафитах (в мас. %)

Table 2. Average chemical compositions of chrome-spinel and magnetite from ultramafites (wt. %)

Порода/Rock	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	NiO	MnO
Кулибинская площадь/Kulibinskaya area								
Кингашский комплекс/Kingashsk complex								
Дуниты-1 Dunite-1 (4)	0,63	0,68	0,09	17,04	80,07	1,00	н.о.	0,13
Дуниты-2 Dunite-2 (6)	1,17	0,41	0,23	8,12	87,03	2,39	н.о.	0,31
Верлиты Verlite (6)	4,37	0,31	0,63	1,86	91,40	3,15	н.о.	0,13
Пикриты Picrite (4)	1,80	0,14	0,63	0,75	95,53	1,47	н.о.	н.о.
Идарский комплекс/Idarsk complex								
Дуниты-1 Dunite-1 (8)	0,81	0,17	1,44	15,57	79,03	2,62	0,64	0,46
Дуниты-2 Dunite-2 (3)	0,66	0,73	2,02	33,88	58,22	3,30	н.о.	0,50
Дуниты-3 Dunite-3 (2)	0,56	0,00	19,9	44,91	25,13	7,86	н.о.	н.о.
Гарцбургиты-1 Harzburgite-1 (4)	1,01	0,22	0,75	14,58	79,81	2,62	0,95	0,62
Гарцбургиты-2 Harzburgite-2 (2)	1,57	0,66	12,48	31,09	48,93	4,82	0,56	0,35
Ортопироксениты-1 Orthopyroxene-1 (3)	1,87	0,13	4,74	37,09	51,27	4,23	0,59	0,41
Ортопироксениты-2 (1) Orthopyroxene-2 (1)	0,95	н.о.	2,03	1,82	95,04	0,68	0,57	0,00
Кингашский рудный район/Kingashsk ore region								
Кингашский комплекс/Kingashsk complex								
Дуниты-1 Dunite-1 (1)	н.о.	0,14	32,87	29,96	26,31	9,39	0,07	0,20
Дуниты-2 Dunite-2 (1)	н.о.	1,96	3,66	30,70	59,86	2,77	0,06	0,57
Верлиты Verlite (2)	н.о.	0,40	28,40	26,81	34,93	8,65	0,12	0,44
Пикриты-1 Picrite-1 (2)	н.о.	0,61	8,86	21,79	62,98	4,91	0,12	0,54
Пикриты-2 Picrite-2 (1)	н.о.	0,63	26,10	25,89	40,56	5,58	0,13	0,55
Пикриты-3 Picrite-3 (1)	н.о.	0,10	46,99	16,37	25,50	10,72	0,23	0,13
Идарский комплекс/Idarsk complex								
Дуниты Dunite (2)	н.о.	0,20	24,62	38,08	27,03	9,30	0,09	0,58
Гарцбургиты Harzburgite (2)	н.о.	0,06	41,16	24,51	19,63	14,57	0,16	0,33
ЮВ Восточного Саяна (Оспинский массив) SE of East Sayan (Ospinsk massif)								
Офиолитовый комплекс/Ophiolitic complex								
Дуниты Dunite (2)	н.о.	0,08	12,07	56,21	22,03	9,09	0,08	0,50
Гарцбургиты Harzburgite (2)	н.о.	0,02	13,07	57,54	18,76	11,02	0,04	0,25

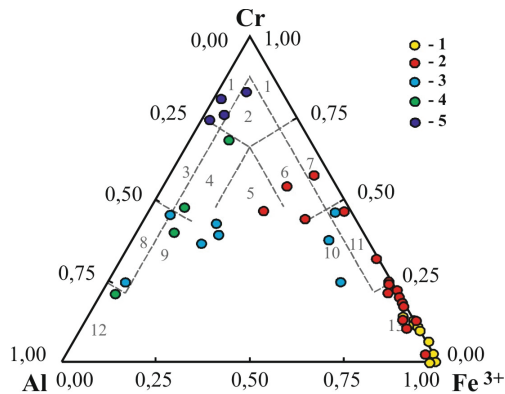


Рис. 5. Составы хромшпинелидов и магнетитов в породах кингашского и идарского комплексов Канской глыбы. 1–2 – Кулибинская площадь: 1 – кингашский комплекс, 2 – идарский комплекс; 3–4 – Кингашский рудный район: 3 – кингашский комплекс, 4 – идарский комплекс; 5 – офиолитовый комплекс (Оспинский массив). Поля на классификационной диаграмме [17]. 1 – хромит, 2 – субферрихромит, 3 – алюмохромит, 4 – субферриалюмохромит, 5 – ферриалюмохромит, 6 – субалюмо-феррихромит, 7 – феррихромит, 8 – хромпикотит, 9 – субферрихромпикотит, 10 – субалюмохроммагнетит, 11 – хроммагнетит, 12 – пикотит, 13 – магнетит

Fig. 5. Composition of chrome-spinel in the rocks of kingashsk and idarsk complexes of Kansk block. 1–2 is the Kulibinskaya area: 1 is the kingashsk complex, 2 is the idarsk complex. 3–4 is the Kingashsk ore region: 3 is the kingashsk complex, 4 is the idarsk complex; 5 is the ofiolitic complex (Ospinsk massif). Fields on the classification chart [19]: 1 – chromite, 2 – subferrochromite, 3 – alumochromite, 4 – subferroalumochromite, 5 – ferroalumochromite, 6 – subalumoferrochromite, 7 – ferrochromite, 8 – chromepicotite, 9 – subferrochromepicotite, 10 – subalumochromemagnetite, 11 – chromemagnetite, 12 – picotite, 13 – magnetite

Клинопироксены

По химическому составу клинопироксены из серпентинизированных верлитов и пикритов Кулибинской площади соответствуют диопсиду, а из верлитов – авгиту (табл. 4, рис. 7) [26]. В них проявляется существенная неоднородность. Вариация железистости ($Fs = Fe / (Ca + Fe + Mg) \cdot 100$) возрастает от верлитов к пикритам, при этом соотношение En/Wo изменяется в этом направлении примерно от 2/1 до 1/1. Al_2O_3 и Cr_2O_3 постоянно отмечаются в породах. Эволюция составов клинопироксенов от верлитов к пикритам, очевидно, обусловлена магматической дифференциацией исходного пикритового расплава, которая реализовалась уменьшением магния и накоплением кальция, при незначительном возрастании железа.

Таблица 3. Средние химические составы ортопироксенов в респитовых ультрамафитах (в мас. %)

Table 3. Average chemical compositions of orthopyroxenes from ultramafites (wt. %)

Порода/Rock	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Wo	Fs	En
Дуниты Dunite (4)	58,63	0,17	4,63	36,69	0,09	0,16	6,59	93,25
Гарцбургиты Harzburgite (3)	59,49	0,56	4,47	35,48	0,26	0,48	6,54	92,98
Ортопироксениты Orthopyroxenite (3)	58,82	0,41	6,54	34,18	0,27	0,39	9,61	89,99

Примечание/Note:

$Wo = Ca / (Ca + Fe + Mg) \cdot 100$, $Fs = Fe / (Ca + Fe + Mg) \cdot 100$,

$En = Mg / (Ca + Fe + Mg) \cdot 100$.

В Кингашском рудном районе вариации состава клинопироксена в верлитах и пикритах более значительные (табл. 4). Верлиты по структурным особенностям разделяются на два контрастных ти-

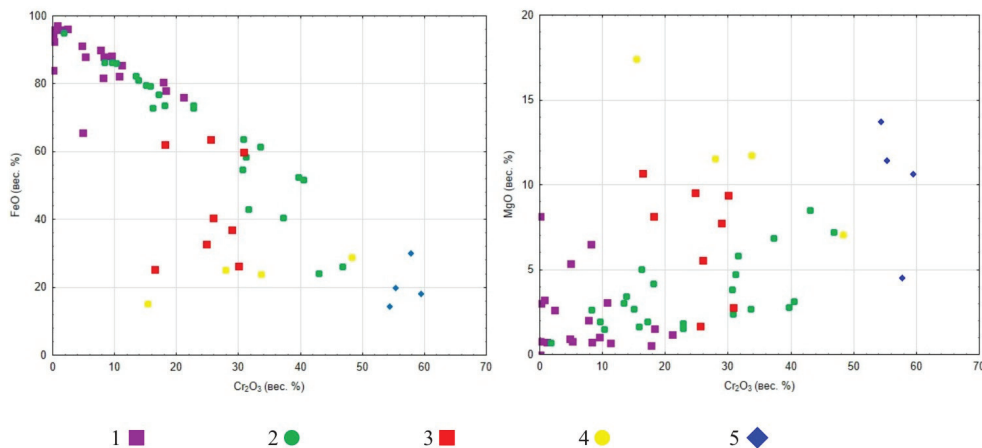


Рис. 6. Составы хромшпинелидов в породах кингашского и идарского комплексов Канской глыбы. 1–2 – Кулибинская площадь: 1 – кингашский комплекс, 2 – идарский комплекс; 3–4 – Кингашский рудный район: 3 – кингашский комплекс, 4 – идарский комплекс; 5 – офиолитовый комплекс (Оспинский массив)

Fig. 6. Composition of chrome-spinel in the rocks of kingashsk and idarsk complexes of Kansk block. 1–2 is the Kulibinskaya area: 1 is the kingashsk complex, 2 is the idarsk complex. 3–4 is the Kingashsk ore region: 3 is the kingashsk complex, 4 is the idarsk complex; 5 is the ofiolitic complex (Ospinsk massif)

па. В первом типе (верлиты-1) клинопироксен наблюдается в интерстициях кумулюсных зерен оливина и представлен клиноэнстатитом, который отличается высокими содержаниями магния, железа и очень низкими содержаниями кальция, титана и хрома. Этот тип верлитов является более ранним дифференциатом. Второй тип верлитов-2 является аналогичным верлитам на Кулибинской площади и характеризуется наличием кумулюсных зерен клинопироксена и оливина. Эти верлиты являются более поздними дифференциатами. Клинопироксен кумулюсных зерен в верлитах и порфирированных вкрапленников в пикритах представлен диопсидом, для которого отмечается повышение FeO от первых ко вторым, подобно Кулибинской площади. Однако соотношение En/Wo остается практически неизменным и соответствует примерно 1/1. Составы клинопироксена в верлитах и пикритах кингашского комплекса отчетливо отражают магматическую дифференциацию исходного пикритового расплава, продуктами кристаллизации которого они являются.

Таблица 4. Средние химические составы клинопироксенов из магматических ультрамафитов кингашского комплекса (в мас. %)

Table 4. Average chemical compositions of clinopyroxenes from magmatic ultramafites of kingashskiy complex (wt. %)

Порода/Rock	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Wo	Fs	En
Кулибинская площадь /Kulibinskaya area									
Серп. верлиты Serp. verlite (4)	51,99	2,11	3,14	3,82	16,93	24,12	47,56	5,92	46,52
Верлиты (4) Verlite (4)	57,40	1,50	0,39	2,52	21,24	18,07	36,27	3,95	59,79
Пикриты (2) Picrite (2)	52,70	1,75	0,38	4,83	17,00	23,04	45,67	7,47	46,87
Кингашский рудный район (Kingashsk ore region)									
Верлиты-1 Verlite-1 (3)	55,45	1,88	0,08	11,22	31,49	0,23	0,50	16,56	82,94
Верлиты-2 Verlite-2 (4)	51,79	3,25	0,64	4,17	15,77	22,10	46,73	6,94	46,34
Пикриты Picrite (3)	50,92	3,51	0,34	4,69	15,85	22,06	46,23	7,54	46,23

Примечание: Верлиты-1 (клинопироксен в интерстициях), верлиты-2 (клинопироксен кумулюсный);
 $Wo = Ca / (Ca + Fe + Mg) \times 100$, $Fs = Fe / (Ca + Fe + Mg) \times 100$,
 $En = Mg / (Ca + Fe + Mg) \times 100$.

Note: verlite-1 (clinopyroxene in interstices), verlite-2 (cumulose clinopyroxene);
 $Wo = Ca / (Ca + Fe + Mg) \times 100$, $Fs = Fe / (Ca + Fe + Mg) \times 100$,
 $En = Mg / (Ca + Fe + Mg) \times 100$.

Выводы

В результате проведенных комплексных петрологических исследований среди изучаемых пород выделены ультрамафиты продуктивного на медно-никелевое оруденение кингашского комплекса и ультрамафиты идарского комплекса. Проведено сравнение ультрамафитов с аналогичными образованиями Кингашского рудного района. По матери-

алам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Канская глыба расположена в краевой ЮЗ части Сибирской платформы на границе с Центрально-Азиатским складчатым поясом и ограничена зонами Главного разлома Восточного Саяна и Канско-Агульского. Она имеет сложное блоково-чешуйчато-надвиговое строение, представляет собой гранит-зеленокаменную область и является типичной раннедокембрийской металлогенической провинцией, аналогичной провинциям Балтийского щита, западной Австралии, юга Южно-Африканского щита и Канады, с которыми связаны Cu-Ni, платиноидные и Au-месторождения [27–29].

В пределах глыбы выделяются два зеленокаменных пояса (ЗКП): Идарский и Канский [12]. В Идарском ЗКП ареал рассеивания многочисленных ультрамафитовых тел объединяется в Кингашский рудный район, в котором находится Кингашский эталонный массив, вмещающий одноименное медно-никелевое месторождение с платиноидами. Исследуемая Кулибинская площадь является Кирельским фрагментом северо-западной части Канского ЗКП. В ее пределах также выявлены мелкие тела потенциально рудоносных ультрамафитов.

2. Магматические ультрамафиты кингашского комплекса имеют неоднородный петрографический состав. Они представлены дунитами, верлитами, лерцолитами, клинопироксенитами и метапикритами. Соотношения между разновидностями значительно варьируют в разных массивах. Такое разнообразие пород обусловлено степенью дифференцированности исходных высокомагнезиальных расплавов и глубиной их кристаллизации. Дифференциация расплава, очевидно, осуществлялась гравитационной отсадкой оливина в промежуточных камерах [28], поэтому для пород кингашского комплекса характерно наличие кумулятивных и бластопорфирированных микроструктур, свидетельствующих об их образовании в гипабиссальных и субвулканических условиях. Ультрамафиты кингашского комплекса Кулибинской площади по структурно-петрографическим характеристикам схожи с аналогичными образованиями Кингашского рудного района.

Реститовые ультрамафиты идарского комплекса представлены преимущественно дунитами, гарцбургитами и реже ортопироксенитами. Особенностью пород является наличие в них гранобластовых и порфирокластовых структур, свойственных метаморфическим перидотитам из офиолитовых комплексов [13–15]. Их можно отнести к метаморфическим перидотитам дунит-гарцбургитовой ассоциации, характерной для нижней части офиолитовых покровов [30, 31], которые представляют собой реститовые образования, возникшие в процессе деплетирования исходного мантийного субстрата [32]. Затем они были выведены в верхние этажи литосферы по глубинным надвигам, об-

рамляющим с юго-запада Сибирскую платформу.

3. Анализ химического состава минералов Кулибинской площади показал как сходства, так и существенные различия с аналогичными образованиями Кингашского рудного района. Это касается, в первую очередь, оливина и хромшпинелидов. На Кулибинской площади выделены дуниты двух фаз с различными составами оливина. В дунитах первой фазы оливина наименее железистые и представлены магнезиальным хризолитом. Оливины из дунитов второй фазы отличаются заметно большей железистостью и представлены хризолитом. При этом оливин из куммулятивных дунитов Кингашского рудного района по железистости занимает промежуточное положение между оливинами дунитов двух фаз Кулибинской площади. Причём составы оливина в верлитах и пикритах являются близкими, отмечается лишь небольшое уменьшение их железистости в Кингашском массиве. Наличие дунитов кингашского комплекса со значимо различающимися составами оливинов говорит об их формировании в два этапа, в отличие от дунитов Кингашского массива. Этот вывод согласуется с моделью эволюции исходного высокомагнезиального пикритового расплава. Составы оливинов в породах идарского комплекса изучаемой площади и Кингашского рудного района близкие и соответствуют форстериту. Их незначительные вариации, очевидно, отражают неравномерную степень деплетирования мантийного вещества.

Хромшпинелиды в породах кингашского комплекса Кулибинской площади интенсивно метаморфизованы до магнетитов. Состав их в целом однороден для всех разновидностей пород, однако в магнетитах дунитов первой фазы отмечается повышение хромистости. В отдельных точках отмечаются примеси никеля и серы, что связано с замещением магнетитом сульфидов железа. Хромшпинелиды пород кингашского комплекса в Кингашском рудном районе существенно более хромистые, менее железистые и отличаются широкими вариациями состава, что связано с меньшей степенью метаморфизованности. Хромшпинелиды в породах идарского комплекса Кулибинской площади в сравнении с Кингашским рудным районом также обнаруживают существенно более высокую железистость, однако, в отличие от магнетитов кингашского комплекса, их состав значимо варьирует в разных массивах. Это связано как с отличием исходного состава минералов, так и со степенью метаморфизованности пород идарского комплекса на Кулибинской площади.

Наиболее достоверным критерием для определения формационной принадлежности ультрамафитов оказался состав оливина. Как на изучаемой площади, так и в эталонном Кингашском рудном районе, оливины из пород кингашского комплекса существенно отличаются от оливинов идарского на обеих территориях и образуют на диаграммах самостоятельные непересекающиеся поля распространения фигуративных точек. При этом закономерное изменение химического состава оливина в изучаемых ультрамафитах кингашского комплекса отражает дифференциацию исходного высокомагнезиального пикритового расплава с последовательным образованием соответствующего ряда пород: дуниты → верлиты → пикриты. В ультрамафитах идарского комплекса различия в составах минералов связаны с неравномерной степенью деплетирования мантийного вещества и последующим их метаморфизмом.

4. Для зеленокаменных поясов Канской глыбы нами впервые предложены петрографический и петрохимический критерии разделения ультрамафитов на два генетически различных комплекса: кингашский магматический дунит-верлит-пикритовый и идарский реститовый дунит-гарцбургитовый. Наибольший интерес представляют потенциально рудоносные ультрамафиты кингашского комплекса с медно-никелевой сульфидной минерализацией. Тогда как в реститовых ультрамафитах количество никеля является отображением его содержания в породообразующих оливинах и практической ценности не представляет. Однако, в свою очередь, ультрамафиты кингашского комплекса имеют очень пестрый петрографический состав, отражающий различную степень кристаллизационной дифференциации исходного высокомагнезиального пикритового магматического расплава. Наиболее благоприятными для оруденения являются куммулятивные дуниты, которые представляют собой наиболее ранние дифференциаты и с которыми связано Кингашское месторождение никеля, меди и благородных металлов. Верлиты и пикриты, очевидно, менее благоприятны для оруденения, так как основная масса рудных компонентов, очевидно, была сосредоточена в более магнезиальном расплаве, насыщенном куммулятивными зернами оливина. Последующие метаморфогенные преобразования ультрамафитов способствовали разубожеванию, перераспределению и сегрегации ценных компонентов, как это было показано для ультрамафитов Кингашского массива [33].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naldrett A.J. Magmatic Sulfide Deposits. – New York: Oxford University Press, 1989. – 196 p.
2. Barrie C.T., Naldrett A.J. The geology and tectonic setting of the Montcalm Gabbroic Complex and Ni-Cu deposit, Western Abitibi Subprovince, Ontario, Canada // Proc. of the 5th Magmatic Sulfides Conference. – Harare, Zimbabwe, Special Publication Institution of Mining and Metallurgy, 1988. – P. 151–164.
3. Gresham J.J., Loftus-Hills G.D. The Geology of the Kambalda Nickel Field, Western Australia // Economic Geology. – 1981. – V. 76. – P. 1373–1416.
4. Naldrett A.J., Turner A.R. The geology and petrogenesis of a greenstone belt and related nickel sulfide mineralization at Yakabindi // Western Australia: Precambrian Research. – 1977. – V. 5. – P. 43–103.
5. Кислов. Е.В. Северо-байкальская платинометалло-медь-никеленосная провинция // Геология, геофизика и минеральное

- сырье Сибири: материалы 1-й науч.-практ. конф. Т. 1. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. – С. 56–61.
6. Канский зеленокаменный пояс и его металлогения (Восточный Саян) / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханин, А.П. Романов, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – 134 с.
 7. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г. Кингашское платино-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – С. 56–61.
 8. Геология и перспективы сульфидного Pt-Cu-Ni оруденения восточной части Алтае-Саянской складчатой области / С.С. Сердюк и др. – Красноярск: Изд-во «Город», 2010. – 184 с.
 9. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrogeochemical Typification of the Ultramafic Rocks from the Idar Greenstone Belt, Kan Block, East Sayan // *Geochemistry International*. – 2010. – V. 48. – № 2. – P. 118–139.
 10. Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // *Руды и металлы*. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
 11. Корнев Т.Я., Еханин А.Г. Эталон Кингашского базальт-коматитового комплекса (Восточный Саян). – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1997. – 89 с.
 12. Состав, строение и условия формирования метаосадочно-вулканогенных комплексов Канского зеленокаменного пояса (Северо-Западное Присаянье) / А.Д. Ножкин, О.М. Туркина, Е.В. Бибикина, В.А. Пономарчук // *Геология и геофизика*. – 2001. – Т. 42. – № 7. – С. 1058–1078.
 13. Karato S-I. The Dynamic structure of the deep Earth. – Princeton: Princeton University Press, 2003. – 256 p.
 14. Wenk H-R. Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: an Introduction to Modern Texture Analysis. – Orlando, FL: Academic, 1985. – 610 p.
 15. Nicolas A., Poirier J.P. Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. – New York: Wiley-Interscience, 1976. – 444 p.
 16. Трегер В.Е. Оптическое определение породообразующих минералов. – М.: Недра, 1968. – 198 с.
 17. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // *Тр. ИГН АН СССР. Сер. рудн. месторождения*. – 1949. – Вып. 103. – 87 с.
 18. Кичеева А.В., Чернышов А.И. Особенности минералогического состава ультрамафитов и хромититов Эргакского массива (северо-восточная часть Западного Саяна) // *Металлогения древних и современных океанов–2015. Месторождения океанических структур: геология, минералогия, геохимия и условия образования*. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2015. – № 21. – С. 86–89
 19. Genesis of ultramafic rocks of the Alkhadyr terrane (East Sayan, Siberia): Implications from the data on Cr-spinel compositions / Y. Bedyuk, A.S. Mekhonoshin, T.B. Kolotilina, A.A. Doroshkov, V.A. Simonov, S.I. Stupakov // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – T. 56. – № 9. – P. 1308–1321.
 20. Barnes S.J., Kunilov V.Y. Spinels and Mg-ilmenites from the Noril'sk 1 and Talmakh intrusions and other mafic rocks of the Siberian flood basalt province // *Economic Geology*. – 2000. – V. 95. – P. 1701–1717.
 21. Акцессорные хромшпинелиды из мезозойских коматитов Фенноскандинавского щита / З.П. Рыбникова, С.А. Светов, А.Б. Вревский, Е.А. Климовская, С.Ю. Чаженгина // *Литосфера*. – 2014. – № 6. – С. 22–44.
 22. Савельев Д.Е. Вариации состава акцессорных и рудообразующих хромшпинелидов массивов Крака (Южный Урал) и их генетическое значение // *Металлогения древних и современных океанов–2016. Месторождения океанических структур: геология, минералогия, геохимия и условия образования*. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. – № 22. – С. 58–62.
 23. Юричев А.Н. Минералогические особенности офиолитовых ультрабазитов как критерии оценки их потенциальной // *Металлогения древних и современных океанов–2016. Месторождения океанических структур: геология, минералогия, геохимия и условия образования*. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. – № 22. – С. 70–74.
 24. Savelieva G.N., Batanova V.G., Sobolev A.V. Pyroxene-Cr-spinel exsolution in mantle lherzolites of the Syum-Keu ophiolite massif (Arctic Urals) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – № 57. – P. 1419–1436.
 25. Малахов И.А. Петрохимия ультрабазитов Урала. – Свердловск: Изд-во ИГиГ УФАИ СССР, 1966. – 234 с.
 26. Nomenclature of pyroxenes / N. Morimoto, J. Fabries, A.K. Ferguson et al. // *American Mineralogist*. – 1988. – V. 73. – P. 1123–1133.
 27. Коматиты и высокомагнезиальные вулканы раннего докембрия Балтийского щита / отв. ред. О.А. Богатиков. – Л.: Наука, 1988. – 192 с.
 28. Полезные ископаемые Австралии и Папуа-Новой Гвинеи / под ред. К. Найта. Т. 1. – М.: Мир, 1980. – 658 с.
 29. Condie K.C. Archaean greenstone belts. – Amsterdam: Elsevier, 1981. – 434 p.
 30. Добрецов Н.Л. Модель покровной тектоники Восточного Саяна // *Геотектоника*. – 1985. – № 1. – С. 39–50.
 31. Coleman R.G. Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere? – Berlin: Springer Verlag, 1977. – 229 p.
 32. Nicolas A. Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithospheres. – Kluwer: Academic Press, 1989. – 367 p.
 33. Кингашский мафит-ультрамафитовый массив: геологическое положение, внутреннее строение, вещественный состав и петроструктурный анализ ультрамафитов (Восточный Саян) / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, С.И. Ступаков., П.А. Балыкин, Н.И. Кузоватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, В.А. Прохорова // *Платина России. Проблемы развития, оценки, воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов. Сб. научн. Трудов*. – 2004. – Т. V. – С. 152–175.

Поступила 15.11.2016 г.

Информация об авторах

Чернышов А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры петрографии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Бабинцев Н.А., старший геолог лаборатории геохимических методов Красноярского научно-исследовательского института геологии и минерального сырья.

Ворошилов В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.321.6

PETROCRAFICAL AND MINERALOGICAL FEATURES OF ULTRAMAFITS FROM KIRELSK FRAGMENT OF KANSK GREENSTONE BELT (NW OF THE EAST SAYAN)

Aleksey I. Chernyshov¹,

aich@ggf.tsu.ru

Nikita A. Babintsev²,

mas9915@mail.ru

Valery G. Voroshilov³,

v_g_v@tpu.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources,
55, Mira Avenue, Krasnoyarsk, 66049, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Ultramafits of the studied territory are perspective on detection of Cu-Ni with platinum-group elements deposits that causes the relevance of their research.

The main aim of the study. Petrologic researches were directed to establishing the formational accessory of ultramafits of Kulibinskaya area, extraction of the main petrographic varieties and identification of potentially ore-bearing types of rocks.

The methods used in the study. Detailed petrographic studying of ultramafits realized on a polarisation microscope «AxioScop 40» (Carl Zeiss) that allowed revealing their main varieties and determining their formational accessory by structural features. Composition of minerals and rocks was generally studied in the Center of collective use «Analytical center of a geochemistry of natural systems» at Tomsk State University. Chemical composition of rock-forming minerals was estimated on the electronic scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with the energy-dispersion spectrometer INCA Energy 350 and the wave-dispersion spectrometer INCA Wave 700. Contents of rare and rare-earth elements were defined by the ICP-MS method on a spectrometer of the Agilent 7500 series. Bulk chemical composition was defined by the quantitative chemical analysis in the laboratory of the «Minusinsk GRE» (Minusinsk).

The results. It was ascertained that ultramafits in the explored territory are divided into two formational types and united in two complexes: kingashsk magmatic dunite-verlite-picritic and idarsk restite dunite-harzburgitic. The ultramafits of a kingashsk complex composing bodies of the subvolcanic facies are the subject of the greatest practical interest. They are presented by dunites, verlites, their serpentinised varieties and picrites with various structures, which are derivants of primary high-magnesian picritic magma. Cumulative or porphyryc structures are typical for them. They form a persistent trend of a variation of chemical composition of minerals, which reflects serial magmatic differentiation of an initial high-magnesian picritic melt. It is established that ore components stand apart, mainly, in the interstices, or in a groundmass. Cumulative dunites and their serpentinised varieties which form ore-bearing Kingashsk massif are optimum for Cu-Ni-PGE mineralization. The subsequent more differentiated varieties are depleted by valuable components. Restite ultramafits are presented by the rocks of dunite-gartsburgitic association with the reference metamorphic granoblastic structures. They differ in more homogeneous high-magnesian chemical composition of minerals caused by intensive depletion of initial mantle substratum.

Key words:

Petrology, magmatic and restite ultramafits, dunite, harzburgite, verlite, picrite, olivine, pyroxenes, chrome-spinel.

REFERENCES

- Naldrett A.J. *Magmatic Sulfide Deposits*. New York, Oxford University Press, 1989. 196 p.
- Barrie C.T., Naldrett A.J. The geology and tectonic setting of the Montcalm Gabbroic Complex and Ni-Cu deposit, Western Abitibi Subprovince. Ontario, Canada. *Proc. of the 5th Magmatic Sulfides Conference*. Harare, Zimbabwe, Special Publication Institution of Mining and Metallurgy, 1988. pp. 151–164.
- Gresham J.J., Loftus-Hills G.D. The Geology of the Kambalda Nickel Field, Western Australia. *Economic Geology*, 1981, vol. 76, pp. 1373–1416.
- Naldrett A.J., Turner A.R. The geology and petrogenesis of a greenstone belt and related nickel sulfide mineralization at Yakabindi. *Western Australia: Precambrian Research*, 1977, vol. 5, pp. 43–103.
- Kislov E.V. Severo-Baykalskaya platinometalno-med-nikelenosnaya provintsiya [North-Baikalsk Pt-Cu-nickeliferous province]. *Geologiya, geofizika i mineralnoe syre Sibiri: materialy pervoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology, geophysics and mineral resources of Siberia: proc. 1st scientific conference]. Novosibirsk, SNIIGiMS Press, 2014. Vol. 1, pp. 56–61.
- Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Romanov A.P., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. *Kanskiy zelenokamenny poyas i ego metallogeniya (Vostochnyy Sayan)* [Kansk greenstone belt and its metallogeny (East Sayan)]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2003. 134 p.
- Glazunov O.M., Bognibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platinomedno-nikelevoe mestorozhdenie* [Kingash Pt-Cu-Ni deposit]. Irkutsk, IGTU Press, 2003. 190 p.
- Serdyuk S.S. *Geologiya i perspektivy sulfidnogo Pt-Cu-Ni orudeniya vostochnoy chasti Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Geology and perspectives of sulfidic Pt-Cu-Ni mineralization in eastern part of Altay-Sayan folding system]. Krasnoyarsk, Gorod Publ., 2010. 184 p.
- Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrogeochemical Typification of the Ultramafic Rocks from the Idar Greenstone Belt, Kan Block, East Sayan. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 118–139.

10. Yurichev A.N. Mafic-ultramafic magmatism of the Kansk block and its ore potential, northwest of Eastern Sayan. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20. In Rus.
11. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G. *Etalon Kingashskogo basalt-komatiitovogo kompleksa (Vostochniy Sayan)* [Standard of Kingash basalt-comatiitic complex (East Sayan)]. Novosibirsk, SNIIGiMS Press, 1997. 89 p.
12. Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bibikova E.V., Ponomarchuk V.A. *Sostav, stroenie i usloviya formirovaniya metaosadochno-vulkanogennykh kompleksov Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Severo-Zapadnoe Prisyayane)* [Constitution, structure and conditions of forming metasedimentary-volcanic complexes of Kansk greenstone belt (North-West Sayan)]. *Geologiya i geofizika*, 2001, no. 7, pp. 1058–1078.
13. Karato S-I. *The Dynamic structure of the deep Earth*. Princeton, Princeton University Press, 2003. 256 p.
14. Wenk H-R. *Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: an Introduction to Modern Texture Analysis*. Orlando, FL, Academic, 1985. 610 p.
15. Nicolas A., Poirier J.P. *Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks*. New York, Wiley-Interscience, 1976. 444 p.
16. Treger V.E. *Opticheskoe opredelenie porodoobrazuyushchikh mineralov* [Optical diagnostics of rock-forming minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 198 p.
17. Pavlov N.V. *Khimicheskii sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ultrasnovnykh intruzivov* [Chemical composition of chrome-spinels in connection with petrographical composition of rocks in ultramafic intrusions]. Trudy IGN AN SSSR [Proc. IGN USSR AC]. Moscow, USSR AS Publ., 1949. Iss. 10, no. 13, 87 p.
18. Kicheeva A.V., Chernyshov A.I. Osobennosti mineralogicheskogo sostava ultramafitov i khromititov Ergakskogo massiva (severovostochnaya chast Zapadnogo Sayana) [Features of mineralogical composition of ultramafits and chromitites from Ergaksk massif (north-east part of West Sayan)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov–2015. Mestorozhdeniya okeanicheskikh struktur: geologiya, mineralogiya, geokhimiya i usloviya obrazovaniya*. Miass, IMin UB RAS, 2015. No. 21, pp. 86–89.
19. Bedyuk Y., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., Doroshkov A.A., Simonov V.A., Stupakov S.I. Genesis of ultramafic rocks of the Alkhadyr terrane (East Sayan, Siberia): Implications from the data on Cr-spinel compositions. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 9, pp. 1308–1321.
20. Barnes S.J., Kunilov V.Y. Spinels and Mg-ilmenites from the Noril'sk 1 and Talnakh intrusions and other mafic rocks of the Siberian flood basalt province. *Economic Geology*, 2000, vol. 95, pp. 1701–1717.
21. Rybnikova Z.P., Svetov S.A., Vrevskiy A.B., Klimovskaya E.A., Chazhengina S.Yu. Accessory chrome spinels in mesoarchean komatiites of the Fennoscandian shield. *Litosfera*, 2014, no. 6, pp. 22–44. In Rus.
22. Savelev D.E. Variatsii sostava aktsessornykh i rudoobrazuyushchikh khromshpinelidov massivov Kraka (Yuzhny Ural) [Composition variations of accessory and ore chrome spinels from massifs of Kraka (South Urals)]. *Metallogeny of ancient and modern oceans–2016. From mineral genesis to deposits. Proc. of the XXII Scientific Youth School*. Miass, IMin UB RAS, 2016. No. 22, pp. 58–62.
23. Yurichev A.N. Mineralogicheskie osobennosti ofiolitovykh ultrabazitov kak kriterii ikh potentsyalnoy rudonosnosti [Mineralogical specifics of ofiolitic ultramafits as criterion of their ore-potentiality]. *Metallogeny of ancient and modern oceans–2016. From mineral genesis to deposits. Proc. of the XXII Scientific Youth School*. Miass, IMin UB RAS, 2016. No. 22, pp. 70–74.
24. Savelieva G.N., Batanova V.G., Sobolev A.V. Pyroxene-Cr-spinel exsolution in mantle lherzolites of the Syum-Keu ophiolite massif (Arctic Urals). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, no. 57, pp. 1419–1436.
25. Malakhov I.A. *Petrokhimiya ultrabazitov Urala* [Petrochemistry of Ural's ultramafits]. Sverdlovsk, IGI UFAN SSSR Press, 1966. 234 p.
26. Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 1988, vol. 73, pp. 1123–1133.
27. *Komatiity i vysokimagnezialnye vulkanity rannego dokembriya Baltiyskogo shchita* [Before-cambrian komatiites and high-magnesian volcanites of Baltic shield]. Ed. by O.A. Bogatkov. Leningrad, Nauka Publ., 1988. 192 p.
28. *Poleznye iskopaemye Avstralii i Papua-Novoy Gvinei* [Mineral resources of Australia and Papua New Guinea]. Ed. by K. Nait. Moscow, Mir Publ., 1980. 658 p.
29. Condie K.C. *Archaean greenstone belts*. Amsterdam, Elsevier, 1981. 434 p.
30. Dobretsov N.L. Model pokrovnoy tektoniki Vostochnogo Sayana [Model of cover-tectonics of East Sayan]. *Geotectonics*, 1985, no. 1, pp. 39–50.
31. Coleman R.G. *Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere?* Berlin, Springer Verlag, 1977. 229 p.
32. Nicolas A. *Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithospheres*. Kluwer, Academic Press, 1989. 367 p.
33. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Stupakov S.I., Balykin P.A., Kuzovatov N.I., Reznilov I.G., Tretyakov N.A., Prokhorova V.A. Kingashskiy mafit-ultramafitovy massiv: geologicheskoe polozhenie, vnutrennee stroenie, veshchestvenny sostav i petrostrukturny analiz metamorfитov (Vostochnyy Sayan) [Kingash mafit-ultramafic massif: geological position, internal structure, composition and petrostructural analytics of ultramafits (East Sayan)]. *Platina Rossii. Problemy razvitiya, otsenki, vosproizvodstva i kompleksnogo ispolzovaniya mineralno-syrevooy bazy platinovykh metallov* [Platinum in Russia. Problems of development, assesment, reproduction and complex use of mineral base of platinum metals]. Moscow, Geoinformmark Publ, 2004. pp. 152–175.

Received: 15 November 2016.

Information about the authors

Aleksey I. Chernyshov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk State University.

Nikita A. Babintsev, senior geologist, Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources.

Valery G. Voroshilov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.314.2:632

ВОПРОСЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, РАБОТАЮЩИХ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Диксон Роберт Кристофер¹,
robert_dixon@mail.ru

Михальченко Геннадий Яковлевич²,
kpe-tusur@yandex.ru

Михальченко Сергей Геннадьевич³,
msg@ie-tusur.ru

Русскин Виктор Александрович³,
vrsskn@gmail.com

Семёнов Сергей Михайлович³,
ssm@tpu.ru

¹ Отдел энергетики ЮНЕСКО зоны Карибского бассейна, Ямайка, JMAKN04, Кингстон, Доминика Драйв, 25.

² Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Возобновляемые источники энергии, например фотогальванические элементы и ветрогенераторы, привлекают к себе все большее внимание в связи с дефицитом энергии и истощением запасов ее источников. Устройства такого типа, как правило, дают на выходе низкие величины напряжения. Так, элементарный фотогальванический источник электропитания, на основе p-n перехода, из кремния выдает ЭДС порядка 0,7 В, а на основе германия – 0,4 В. При этом возможности последовательного наращивания выходного потенциала ограничены в связи с необходимостью увеличения параллельных ветвей фотопластин. Решение этой проблемы привело к созданию систем электропитания на основе импульсных преобразователей повышающего типа для электростанций, работающих на основе возобновляемых георесурсов.

Актуальной является задача по улучшению показателей работы этого вида преобразователей. В частности, для определения устойчивости и исследования динамики в математических моделях установок силовой электроники широкое распространение находит метод Якоби. При создании систем электропитания различного назначения использование матрицы Якоби повышает их энергетические показатели. При этом применение функции Пуанкаре для итерационного отображения метода Якоби дает возможность изучения режимов работы преобразователя для конкретных точек после изменения параметров системы. Таким образом, матрица Якоби, являясь безразмерной величиной, позволяет линеаризовать характеристику в фиксированных точках для их анализа. Следовательно, частичное дифференцирование нелинейной структуры является одним из направлений получения конкретных значений, являющихся характеристическим мультипликатором системы – собственными значениями матрицы.

Все исследования проводились на примере двухфазного повышающего преобразователя напряжения (ДППН) с частотно-импульсной модуляцией. Особенность этой работы заключается в использовании матрицы Якоби для линеаризации нелинейных систем при исследовании динамики, с целью нахождения устойчивых и неустойчивых зон функционирования преобразователей энергии. Такой математический подход увеличивает эффективность и надежность преобразователя напряжения путем идентификации аномальных динамических режимов работы в устройстве, тем самым снижая потери энергии, т. е. повышается энергоэффективность системы электропитания.

Цель: разработать альтернативный метод линеаризации с помощью матрицы Якоби для анализа устойчивости работы различных преобразователей. Схема исследуемого преобразователя предполагает накопление энергии в индуктивных элементах для отключения при нулевом токе или нулевом напряжении. Результаты будут представлены в виде отображения Пуанкаре через метод Ньютона–Рафсона–Якоби.

Методы: обзор технических публикаций относительно необходимости использования матриц Якоби для определения устойчивости различных преобразователей. Алгоритм управления двухфазного импульсного преобразователя смоделирован в среде программного обеспечения LTSpice и MATLAB. Анализ соответствующих характеристик ДППН включает в себя методы Якоби и Ньютона–Рафсона. Последний имеет достаточно быструю сходимость и высокую степень точности дискретных значений. Это показано ниже в режимах хаоса и бифуркации.

Результаты. Полученные характеристические мультипликаторы определяют режимы работы системы управления ДППН, разработанным на основе двухфазного импульсного преобразователя. Это позволяет выявить те параметры системы, при которых она функционирует в нормальных или аномальных состояниях, тем самым дает возможность отделить одни режимы функционирования от других, и таким образом повысить надёжность и КПД системы.

Ключевые слова:

Характеристические мультипликаторы, матрица Якоби, отображение Пуанкаре, анализ устойчивости, нелинейная динамическая система, метод Ньютона–Рафсона.

Введение

Технические решения, направленные на получение экологически чистой энергии, с каждым годом приобретают всё большую значимость в связи с увеличивающимся загрязнением окружающей среды. Помимо этого растёт дефицит энергии, что также привлекает внимание к возобновляемым источникам энергии. Применение различных устройств, имеющих отношение к альтернативной энергетике, таких как солнечные батареи или ветрогенераторы, приводит к необходимости разработки импульсных преобразователей постоянного напряжения, надёжно функционирующих в требуемыми энергетическими показателями в широком диапазоне входных напряжений и токов, управляющих воздействий и нагрузок. Преобразователи такого типа обычно используются для согласования уровней тока и напряжения между источником энергии и нагрузкой. Современное положение вещей, диктуемое требованиями высокой энергоэффективности, предполагает применение различных алгоритмов поиска точки максимальной мощности, позволяющих расширить диапазон работы преобразователя по входным и управляющим воздействиям, а также нагрузке. Этот факт требует исследования динамики разрабатываемого устройства, поскольку такие системы являются импульсно-модуляционными, с присущим им эффектом бифуркации [1–9].

Математическая модель двухфазного повышающего преобразователя напряжения

В силовой электронике импульсно-модуляционные системы описываются как кусочно-линейные структуры, нелинейность которых определяется разрывными функциями, описывающими сигналы обратной связи.

Эти сигналы определяют моменты коммутации силовых ключей. Их переключение изменяет топологию схемы преобразователя. При каждом состоянии ключей схема может быть смоделирована аналитически как линейная цепь, и это означает, что устройство описывается кусочно-линейной системой уравнений. Подобные динамические изменения структуры часто приводятся в соответствующих публикациях. Таким образом, данный процесс связан с анализом устойчивости вышеприведенных устройств с использованием матрицы Якоби. Эти матрицы играют важную роль в изучении динамических систем [10, 11]. Матрица Якоби позволяет анализировать динамические процессы в малой окрестности точки или орбиты равновесия (устойчивой или неустойчивой).

Как правило, использование этого метода заключается в изучении бифуркационных явлений, которые могут произойти в преобразователях напряжения. В работе представлены необходимые математические выражения, позволяющие вычислить матрицу Якоби. Предположим, что дана точка равновесия

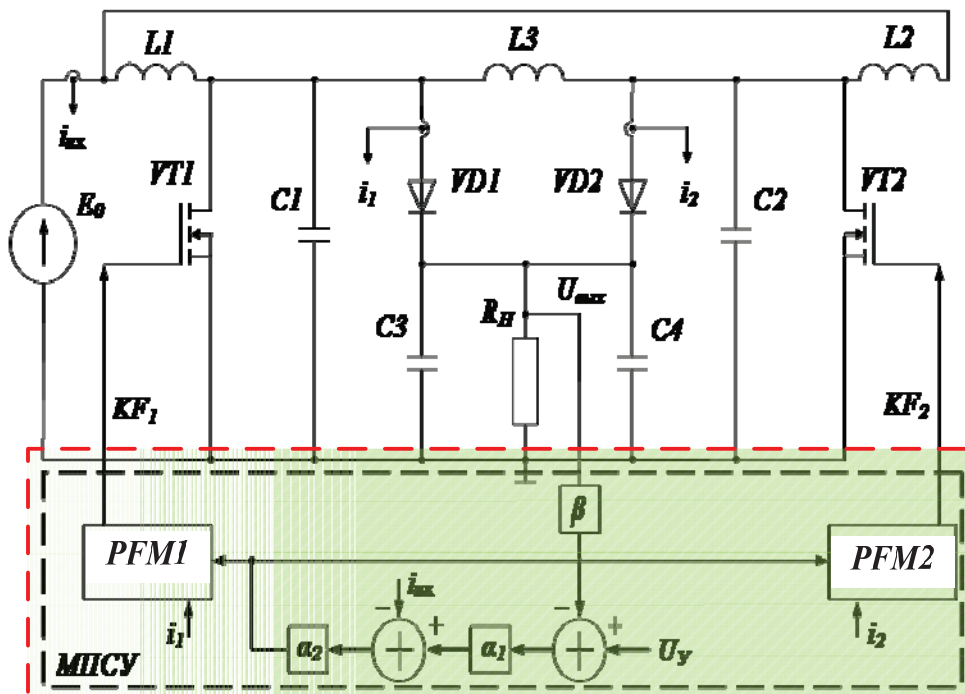


Рис. 1. Принципиальная схема двухфазного повышающего преобразователя с частотно-импульсной модуляцией

Fig. 1. Diagram of two-phase boost DC-DC PFM converter circuit

Таблица 1. Матрицы состояния для соответствующих коммутационных функций

Table 1. State matrices for appropriate switching functions

Матрицы состояния State matrix		Выходные матрицы Output matrix	VT_1	VT_2	VD_1	VD_2
$\mathbf{A}_1 =$	$\begin{bmatrix} -\frac{R+R_0}{L_1} & -\frac{R_0}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{R_0}{L_2} & -\frac{R+R_0}{L_2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_3} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_H C_{c1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{c2}} & \frac{1}{C_{c2}} & 0 & -\frac{1}{R_H C_{c2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_\Phi} & \frac{1}{C_\Phi} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_H C_\Phi} \end{bmatrix}$	$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{E_0}{L_1} \\ \frac{E_0}{L_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$K_{r1}=1$	$K_{r2}=0$	$K_{D1}=0$	$K_{D2}=1$
$\mathbf{A}_2 =$	$\begin{bmatrix} -\frac{R+R_0}{L_1} & -\frac{R_0}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ -\frac{R_0}{L_2} & -\frac{R+R_0}{L_2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{c1}} & \frac{1}{C_{c1}} & 0 & -\frac{1}{R_H C_{c1}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{c2}} & \frac{1}{C_{c2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_H C_{c2}} & 0 \\ \frac{1}{C_\Phi} & \frac{1}{C_\Phi} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_H C_\Phi} \end{bmatrix}$	$\mathbf{B}_2=\mathbf{B}_1$	$K_{r1}=0$	$K_{r2}=0$	$K_{D1}=1$	$K_{D2}=1$
$\mathbf{A}_3 =$	$\begin{bmatrix} -\frac{R+R_0}{L_1} & -\frac{R_0}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ -\frac{R_0}{L_2} & -\frac{R+R_0}{L_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & \frac{1}{L_3} \\ \frac{1}{C_{c1}} & 0 & -\frac{1}{C_{c1}} & -\frac{1}{R_H C_{c1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_H C_{c2}} & 0 \\ \frac{1}{C_\Phi} & 0 & -\frac{1}{C_\Phi} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_H C_\Phi} \end{bmatrix}$	$\mathbf{B}_3=\mathbf{B}_1$	$K_{r1}=0$	$K_{r2}=1$	$K_{D1}=1$	$K_{D2}=0$
$\mathbf{A}_4=\mathbf{A}_2$		$\mathbf{B}_4=\mathbf{B}_1$	$K_{r1}=0$	$K_{r2}=0$	$K_{D1}=1$	$K_{D2}=1$

$\mathbf{X}(nT)=\mathbf{X}$. Матрица Якоби в точке равновесия может быть записана следующим образом

$$\mathbf{X}_{k+1} = f(\mathbf{X}_k, \mathbf{P}^m), \quad (1)$$

где $\mathbf{X}_k = [\mathbf{i}_{L1}, \mathbf{i}_{L2}, \mathbf{i}_{L3}, \mathbf{U}_{C1}, \mathbf{U}_{C2}, \mathbf{U}_C]^T$ – входные параметры; $\mathbf{P}^m = \{U_y, E_0, R_H, \alpha_1, \alpha_2, \tau_k\}$ – чей индекс обозначает значение \mathbf{X}_k в начале цикла k , то есть,

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}(kT).$$

Двухфазный повышающий преобразователь (ДППН) содержит шесть реактивных элементов (три дросселя и три конденсатора), два диода и ак-

тивную нагрузку (рис. 1). Поскольку конденсаторы $C3$ и $C4$ включены параллельно, при написании математических выражений полагаем, что $C=C3+C4$. В табл. 1 показаны состояния параметров принципиальной схемы. Когда ДППН работает в непрерывном режиме, четыре силовых ключа могут быть описаны системами уравнений (2) и (3).

Функция переключения $K_{F1,2}(U_{\text{вых}}, U_y, t)$ определяет тип частотно-импульсной модуляции и способ регулирования необходимых параметров. Проводилось большое количество исследований рабо-

ты системы в режиме непрерывного тока [1–5]. При этом вводится допущение, что ток в соответствующих цепях $VD-R-L-C$ никогда не падает до нуля. В данном исследовании представлена самая простейшая модель с функцией переключения диодов VD_1 и VD_2 и транзисторов VT_1 и VT_2 , находящиеся в противофазе. Эта коммутационная функция может быть описана двойным скаляром $K_{F1,2}$;

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}_i(K_{F1}, K_{F2})\mathbf{X} + \mathbf{B}E_0. \quad (2)$$

В зависимости от состояния коммутирующих элементов, описываемых функциями K_{F1} , K_{F2} , K_{D1} , K_{D2} , матрица \mathbf{A}_i системы принимает различные значения $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, (\mathbf{A}_4 = \mathbf{A}_2)$.

В табл. 1 показаны топологии схемы (рис. 1) для каждого режима работы преобразователя при соответствующем состоянии коммутационных функций K_{F1} и K_{F2} .

Во многих практических задачах недостаточно изучать только непрерывные токи. Как показано в [12–16], динамика в режиме прерывистых токов и поведение системы в целом принципиально отличаются качественно и количественно. В этой связи необходимо рассматривать динамические процессы в зоне прерывистых токов. Таким образом, при частотно-импульсной модуляции вектор переключательной функции $K_{F1,2}(U_c, U_y, t) = f(KF_{VT1,2}, KF_{VD1,2})$ независим от состояния диодов VD_1, VD_2 и транзисторов VT_1, VT_2 .

На рис. 2 представлены диаграммы переключения транзисторов при частотно-импульсной модуляции (ЧИМ).

Частотно-импульсная модуляция включает в себя изменение длины паузы ($\Delta\tau_k = var$), где var – это минимальное значение $2d + \rho$, для $k=1, 2, \dots$ при постоянной длительности импульса ($d = const$ и $\rho = const$). Формирование алгоритма работы ключевых элементов при ЧИМ обычно реализуется генератором линейно-возрастающего напряжения, об-

разуя коммутационные функции, определяющие частоту следования импульсов [7].

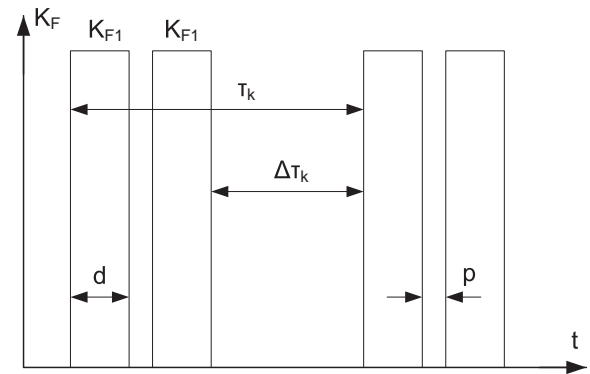


Рис. 2. Временные диаграммы работы частотно-импульсной модуляции

Fig. 2. Diagram of pulse-frequency modulation time

На рис. 3 приведены временные диаграммы токов (i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}) дросселей, сигнала ошибки ($U_{OШ}(X, t)$) и последовательности переключения транзисторов при ЧИМ в ДППН.

Четыре вентиля периодически изменяют своё состояние и при математическом моделировании работы схемы предполагается, что цепь первый раз переключается в момент времени

$$(k-1)\tau_k \leq t < (k-1+d)\tau_k;$$

второй раз

$$(k-1+d)\tau_k \leq t < (k-1+d+\rho)\tau_k;$$

третий

$$(k-1+d+\rho)\tau_k \leq t < (k-1+d+\rho+d)\tau_k;$$

четвертый

$$(k-1+d+\rho+d)\tau_k \leq t < k\tau_k,$$

где k – целое; d – постоянная временных импульсов; ρ – время паузы (постоянная величина); τ_k – пауза между импульсами K_{F1} и K_{F2} (переменная величина).

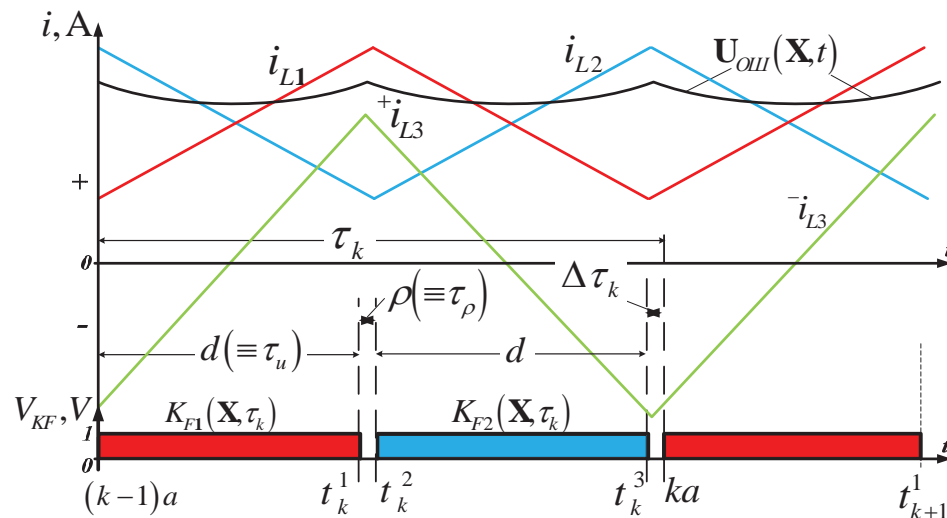


Рис. 3. Временные диаграммы тока в дросселях i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} , K_{F1} и K_{F2} с функцией обратной связи $U_{OШ}$

Fig. 3. Time diagrams of inductors i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} currents, switching functions K_{F1}, K_{F2} and feedback function

Точные уравнения для ДППН, представленные в табл. 1, могут рассматриваться как переменные структуры, которые переключаются в зависимости от состояния диодов и транзисторов. При этом повышающий преобразователь работает в режиме непрерывных токов и может быть описан следующей системой уравнений:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \begin{cases} A_1\mathbf{X} + B, \rightarrow K_{F1} = 1, \\ K_{F2} = 0 \rightarrow (k-1)\tau_k \leq t < (k-1+d)\tau_k; \\ A_2\mathbf{X} + B, \rightarrow K_{F1} = 0, \\ K_{F2} = 0 \rightarrow (k-1+d)\tau_k \leq t < (k-1+d+\rho)\tau_k; \\ A_3\mathbf{X} + B, \rightarrow K_{F1} = 0, \\ K_{F2} = \\ = 1 \rightarrow (k-1+d+\rho)\tau_k \leq t < (k-1+d+\rho+d)\tau_k; \\ A_4\mathbf{X} + B, \rightarrow K_{F1} = 0, \\ K_{F2} = 0 \rightarrow (k-1+d+\rho+d)\tau_k \leq t < k\tau_k, \end{cases} \quad (3)$$

где \mathbf{X} обозначает вектор состояния цепи, т. е. $\mathbf{X}_k = [i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, U_{C1}, U_{C2}, U_C]^T$. Когда значение коммутационной функции перемещается через четыре состояния, решение системы (3) может быть получено аналитически или численно [5]. Поэтапное моделирование волновых форм возможно с использованием кусочной модели переключения. Характеристические мультипликаторы итеративной функции $f(\cdot)$ являются корнями λ характеристического уравнения. Устойчивости точек равновесия ДППН зависят от траектории погрешности системы и определяются величиной собственных значений системы в них. Оценка точки равновесия решается с помощью следующего выражения

$$\det[\lambda E - J_G(\mathbf{X})] = 0. \quad (4)$$

При этом для характеристического уравнения должны выполняться условия, при которых хотя бы один мультипликатор

$$\lim_{\lambda \rightarrow -\infty} \det[\lambda E - J_G(\mathbf{X})] \rightarrow -\infty,$$

а остальные ограничены.

В результате для этого мультипликатора справедливо утверждение:

$$\det[-J_G(\mathbf{X})] > 0. \quad (5)$$

Следовательно, для выражения (5) существует момент времени, начиная с которого по крайней мере один реальный корень λ отрицательный, таким образом, уравнение (4) удовлетворено условиям устойчивости.

Устойчивость точки равновесия и бифуркация Хопфа

Матрица Якоби $J_G(\mathbf{X})$ системы строится в точках равновесия таким образом, что $J_G(\mathbf{X})$ является матрицей, состоящей из итеративных функций $f(\cdot)$, рассчитанных в окрестностях \mathbf{X} . Для повышающих преобразователей с обратной связью по напряжению $f(\cdot)$ может быть записана как

$$\mathbf{X}_{k+1} = \begin{bmatrix} f_1(i_{1,k}, i_{2,k}, i_{3,k}, U_{C1,k}, U_{C2,k}, U_{C,k}, \mathbf{P}^m) \\ \dots \\ f_6(i_{1,k}, i_{2,k}, i_{3,k}, U_{C1,k}, U_{C2,k}, U_{C,k}, \mathbf{P}^m) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Тогда на основании уравнения (6) система (1) принимает форму

$$\begin{bmatrix} i_{L1,k+1} \\ i_{L2,k+1} \\ i_{L3,k+1} \\ U_{C1,k+1} \\ U_{C2,k+1} \\ U_{C,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}(\Delta\tau_k) & f_{12}(\Delta\tau_k) & f_{13}(\Delta\tau_k) & f_{14}(\Delta\tau_k) & f_{15}(\Delta\tau_k) & f_{16}(\Delta\tau_k) \\ f_{21}(\Delta\tau_k) & f_{22}(\Delta\tau_k) & f_{23}(\Delta\tau_k) & f_{24}(\Delta\tau_k) & f_{25}(\Delta\tau_k) & f_{26}(\Delta\tau_k) \\ f_{31}(\Delta\tau_k) & f_{32}(\Delta\tau_k) & f_{33}(\Delta\tau_k) & f_{34}(\Delta\tau_k) & f_{35}(\Delta\tau_k) & f_{36}(\Delta\tau_k) \\ f_{41}(\Delta\tau_k) & f_{42}(\Delta\tau_k) & f_{43}(\Delta\tau_k) & f_{44}(\Delta\tau_k) & f_{45}(\Delta\tau_k) & f_{46}(\Delta\tau_k) \\ f_{51}(\Delta\tau_k) & f_{52}(\Delta\tau_k) & f_{53}(\Delta\tau_k) & f_{54}(\Delta\tau_k) & f_{55}(\Delta\tau_k) & f_{56}(\Delta\tau_k) \\ f_{61}(\Delta\tau_k) & f_{62}(\Delta\tau_k) & f_{63}(\Delta\tau_k) & f_{64}(\Delta\tau_k) & f_{65}(\Delta\tau_k) & f_{66}(\Delta\tau_k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{L1,k} \\ i_{L2,k} \\ i_{L3,k} \\ U_{C1,k} \\ U_{C2,k} \\ U_{C,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E. \quad (7)$$

Итеративная функция $f(\cdot)$ в режиме A_1 записывается аналогично (8), для $i=1,2,3,4,5,6$:

$$f_1(\cdot) = f_{11}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{12}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + g_1(\Delta\tau_k)E_0,$$

$$f_2(\cdot) = f_{21}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{22}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{26}(\Delta\tau_k)U_{C,k} + g_2(\Delta\tau_k)E_0,$$

$$f_3(\cdot) = f_{33}(\Delta\tau_k)i_{3,k} + f_{36}(\Delta\tau_k)U_{C,k},$$

$$f_4(\cdot) = f_{44}(\Delta\tau_k)U_{C1,k},$$

$$f_5(\cdot) = f_{52}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{53}(\Delta\tau_k)i_{3,k} + f_{55}(\Delta\tau_k)U_{C2,k},$$

$$f_6(\cdot) = f_{62}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{63}(\Delta\tau_k)i_{3,k} + f_{66}(\Delta\tau_k)U_{C,k}. \quad (8)$$

Итеративная функция $f(\cdot)$ модели в режиме $A_2=A_4$ может быть записана как

$$f_1(\cdot) = f_{11}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{12}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{16}(\Delta\tau_k)U_{C,k} + g_1(\Delta\tau_k)E_0,$$

$$f_2(\cdot) = f_{21}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{22}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{26}(\Delta\tau_k)U_{C,k} + g_2(\Delta\tau_k)E_0,$$

$$f_3(\cdot) = f_{33}(\Delta\tau_k)i_{3,k},$$

$$f_4(\cdot) = f_{41}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{42}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{44}(\Delta\tau_k)U_{C1,k},$$

$$f_5(\cdot) = f_{51}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{52}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{55}(\Delta\tau_k)U_{C2,k},$$

$$f_6(\cdot) = f_{61}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{62}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{66}(\Delta\tau_k)U_{C,k}. \quad (9)$$

Третья итеративная функция $f(\cdot)$ модели в режиме A_3 записывается следующим образом:

$$f_1(\cdot) = f_{11}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{12}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + f_{16}(\Delta\tau_k)U_{C,k} + g_1(\Delta\tau_k)E_0;$$

$$f_2(\cdot) = f_{21}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{22}(\Delta\tau_k)i_{2,k} + g_2(\Delta\tau_k)E_0;$$

$$\begin{aligned} f_3(\cdot) &= f_{33}(\Delta\tau_k)i_{3,k} + f_{36}(\Delta\tau_k)U_{C,k}; \\ f_4(\cdot) &= f_{52}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{53}(\Delta\tau_k)i_{3,k} + f_{44}(\Delta\tau_k)U_{C1,k}; \\ f_5(\cdot) &= f_{55}(\Delta\tau_k)U_{C2,k}; \\ f_6(\cdot) &= f_{62}(\Delta\tau_k)i_{1,k} + f_{63}(\Delta\tau_k)i_{3,k} + f_{66}(\Delta\tau_k)U_{C,k}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta\tau_k$ вычисляется из уравнения, описывающего закон управления ЧИМ, представленного ниже

$$\Delta\tau_k = \theta\tau_k^{\max} - 2d - \rho, \quad (11)$$

где $\tau_k^{\min} \leq \tau_k \leq \tau_k^{\max}$.

Определение $\Delta\tau_k$ необходимо для того, чтобы моделировать закон управления в зависимости от состояния обратной связи (режим контроля напряжения или тока) для расчета каждого интервала переходного и устойчивого состояния преобразователя напряжения. Закон управления может быть представлен следующим образом

$$U_{\text{оми}i_k^2}(\mathbf{X}, t) = \alpha_2\alpha_1(U_y - \beta\mathbf{U}_k^C) - \alpha_2R_o(i_k^1 + i_k^2). \quad (12)$$

Итеративное уравнение, приведенное ниже, является функцией от τ_k

$$\begin{aligned} \tau_{k+1} &= f(\tau_k); \\ \tau_{k+1} &= \Delta\tau_k = \theta\tau_k - (d + \rho + d), \end{aligned} \quad (13)$$

где τ_k имеет начальное значение, которое находится из уравнения (11):

$$\theta = (\varpi)^{-\text{sign}(\sigma+1)},$$

величина параметра $\varpi=20$ получена подбором из эксперимента.

Регулирование параметров при использовании частотной модуляции для двухфазного повышающего преобразователя напряжения контролируется величиной паузы τ_k . Таким образом, рабочий период системы рассчитывается исходя из условий (11) и вычисляется по нижеприведённым выражениям:

$$\tau_k^{\min} = 2(d + \rho) \text{ и } \tau_k^{\max} = \varpi(d + \rho);$$

$$\sigma = (1 - e^{-U_{\text{оми}}(\mathbf{X}, \tau_k)}),$$

где σ определяется как $0 < \sigma < 1$.

Для одноциклового режима (при условии, что $X(\tau_k)=X_0$) уравнение записывается следующим образом [14]:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k^\Delta(\tau_k) &= \\ &= \mathbf{e}^{A_1(k\tau_k - t_k^3)} \cdot \mathbf{e}^{A_3(t_k^3 - t_k^2)} \cdot \mathbf{e}^{A_2(t_k^2 - t_k^1)} \cdot \mathbf{e}^{A_1(t_k^1 - t_k^0)} \cdot \mathbf{X}_0 + \\ &+ \mathbf{e}^{A_4(k\tau_k - t_k^3)} \cdot \mathbf{e}^{A_3(t_k^3 - t_k^2)} \cdot \mathbf{e}^{A_2(t_k^2 - t_k^1)} \cdot \mathbf{V}_k^0(t - t_k^0) + \\ &+ \mathbf{e}^{A_4(k\tau_k - t_k^3)} \cdot \mathbf{e}^{A_3(t_k^3 - t_k^2)} \cdot \mathbf{V}_k^1(t - t_k^1) + \\ &+ \mathbf{e}^{A_4(k\tau_k - t_k^3)} \cdot \mathbf{V}_k^2(t_k^3 - t_k^2) + \mathbf{V}_k^3(k\tau_k - t_k^3). \end{aligned} \quad (14)$$

Его периодические решения могут быть записаны как

$$\begin{aligned} f(\tau_k) &= \Phi(\tau_k) \left[\begin{aligned} &\Phi(d) \cdot \Phi(\rho) \cdot \Phi(d) \cdot \mathbf{X}_0 + \\ &+ \Phi(d) \cdot \Phi(\rho) \cdot \mathbf{V}_u^0(d) + \\ &+ \Phi(d) \cdot \mathbf{V}_\rho^1(\rho) + \mathbf{V}_u^2(d) \end{aligned} \right] + \\ &+ \mathbf{V}_{\tau_k}^3(\tau_k) - \mathbf{X}_k(\tau_k). \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, находится алгоритм управления исходя из выражений (13), (14):

$$\begin{aligned} U_{\text{оми}}(X, \tau_k) &= \\ &= \begin{cases} U_{\text{оми}} \rightarrow^+ U_{\text{оми}}^\uparrow, & 0 < \sigma < 1, \text{ for } \Phi(\tau_k) > 0; \\ U_{\text{оми}} \rightarrow 0, & \sigma = 1, \text{ for } \Phi(\tau_k) = 0; \\ U_{\text{оми}} \rightarrow^- U_{\text{оми}}^\downarrow, & \sigma < 0, \text{ for } \Phi(\tau_k) < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

Для участка $\tau_k: \tau_{k,\min} \leq \tau_k \leq \tau_{k,\max}$ в любой момент времени для нормальной работы $\Delta\tau_k$ записывается как

$$\tau_k = \Delta\tau_k + 2d + \rho.$$

В уравнениях (15) и (16) метод подстановки используется для упрощения вычислений.

Введем обозначения:

$$f(\tau_k) = \Psi \cdot \mathbf{X}_0 + \Omega - \mathbf{X}_k(\tau_k) = 0;$$

$$\Psi = \Phi(\tau_k) \times \Phi(d) \times \Phi(\rho) \times \Phi(d)$$

и для

$$\Omega = \mathbf{v} \times \mathbf{V}_u^0(d) + \delta \times \mathbf{V}_\rho^1(\rho) + \Delta \times \mathbf{V}_u^2(d) + \mathbf{V}_{\tau_k}^3(\tau_k);$$

$$\begin{cases} \mathbf{v} = \Phi(\tau_k) \times \Phi(d) \times \Phi(\rho); \\ \delta = \Phi(\tau_k) \times \Phi(d); \\ \Delta = \Phi(\tau_k). \end{cases}$$

Тогда, выражение (15) представляется стробоскопическим сопоставлением следующим образом

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_6 &= \prod_{i=6}^1 (\Psi^{(4i-3)})[\mathbf{X}_0] + \\ &+ \prod_{i=6}^2 (\Psi^{(4i-3)})[\mathbf{v}^{(1)}\mathbf{V}_u^0 + \mathbf{v}^{(1)}\mathbf{V}_\rho^0 + \Delta^{(1)}\mathbf{V}_u^0 + \mathbf{V}_\Delta^0] + \\ &+ \prod_{i=6}^3 (\Psi^{(4i-3)})[\mathbf{v}^{(5)}\mathbf{V}_u^1 + \delta^{(5)}\mathbf{V}_\rho^1 + \Delta^{(5)}\mathbf{V}_u^1 + \mathbf{V}_\Delta^1] + \\ &+ \prod_{i=6}^4 (\Psi^{(4i-3)})[\mathbf{v}^{(9)}\mathbf{V}_u^2 + \delta^{(9)}\mathbf{V}_\rho^2 + \Delta^{(9)}\mathbf{V}_u^2 + \mathbf{V}_\Delta^2] + \\ &+ \prod_{i=6}^5 (\Psi^{(4i-3)})[\mathbf{v}^{(13)}\mathbf{V}_u^3 + \delta^{(13)}\mathbf{V}_\rho^3 + \Delta^{(13)}\mathbf{V}_u^3 + \mathbf{V}_\Delta^3] + \\ &+ \prod_{i=6}^6 (\Psi^{(4i-3)})[\mathbf{v}^{(17)}\mathbf{V}_u^4 + \delta^{(17)}\mathbf{V}_\rho^4 + \Delta^{(17)}\mathbf{V}_u^4 + \mathbf{V}_\Delta^4] + \\ &+ \mathbf{v}^{(21)}\mathbf{V}_u^5 + \delta^{(21)}\mathbf{V}_\rho^5 + \Delta^{(21)}\mathbf{V}_u^5 + \mathbf{V}_\Delta^5. \\ \Omega_{m-1}^{4m-3} &\equiv \mathbf{v}^{(4m-3)}\mathbf{V}_u^{(m-1)} + \delta^{(4m-3)}\mathbf{V}_\rho^{(m-1)} + \\ &+ \Delta^{(4m-3)}\mathbf{V}_u^{(m-1)} + \mathbf{V}_\Delta^{(m-1)}. \end{aligned}$$

Может быть выполнена другая подстановка, т. е. шестая итерация записывается:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_6 &= \prod_{i=1}^6 (\Psi^{(4(6-i)+1)})\mathbf{X}_0^0 + \\ &+ \prod_{i=2}^6 (\Psi^{(4(6-i)+5)})\Omega_0^1 + \prod_{i=3}^6 \Psi^{(4(6-i)+9)}\Omega_1^5 + \\ &+ \prod_{i=4}^6 (\Psi^{(4(6-i)+13)})\Omega_2^9 + \prod_{i=5}^6 \Psi^{(4(6-i)+17)}\Omega_3^{13} + \\ &+ \prod_{i=6}^6 (\Psi^{(4(6-i)+21)})\Omega_4^{17} + \Omega_5^{21}. \end{aligned}$$

Итоговое уравнение в k -й итерации получается путем суммирования для $n=k$:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k = & \prod_{i=1}^k (\Psi^{(4(k-i)+1)}) \mathbf{X}_0 + \prod_{i=2}^k (\Psi^{(4(k-i)+5)}) \Omega_0^1 + \\ & + \prod_{i=3}^k (\Psi^{(4(k-i)+9)}) \Omega_1^5 + \prod_{i=4}^k (\Psi^{(4(k-i)+13)}) \Omega_2^9 + \\ & + \prod_{i=5}^k (\Psi^{(4(k-i)+17)}) \Omega_3^{13} + \prod_{i=6}^k (\Psi^{(4(k-i)+21)}) \Omega_4^{17} + \dots + \\ & + \prod_{i=k}^k (\Psi^{(4(2k-i)-3)}) \Omega_{k-2}^{4k-7} + \Omega_{k-1}^{4k-3}. \end{aligned} \quad (17)$$

Сумма, представленная в выражении (17), позволяет получить зависимость

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_m = & \prod_{i=1}^m (\Psi^{(4(m-i)+1)}) [\mathbf{X}_0] + \\ & + \sum_{j=1}^m \left(\prod_{i=j+1}^{m+1} (\Psi^{(4(m-i+j)+5)}) \right) \Omega_{i-1}^{4i-3} + \Omega_m^{4m+1}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $k=m$.

При $k=m$ для периодического сигнала $\mathbf{X}_m(mT) = \mathbf{X}_0(0)$ получим

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_0 = & \left(\mathbf{E} - \prod_{i=1}^m (\Psi^{(4(m-i)+1)}) \right)^{-1} \times \\ & \times \left(\sum_{j=1}^m \left(\prod_{i=j+1}^{m+1} (\Psi^{(4(m-i+j)+5)}) \right) \Omega_{i-1}^{4i-3} + \Omega_m^{4m+1} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Подставив (19) в (18) вместо \mathbf{X}_0 , вычисляем значения m для вектора переменных состояния $\mathbf{X}(t)$ во время переключения через периоды τ_k , $k=1\dots m$. Таким образом, нахождение m -цикла, выраженное в виде стробоскопического сопоставления, представляется в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k = & \prod_{i=1}^k (\Psi^{(4(k-i)+1)}) \times \\ & \times \left[\left(\mathbf{E} - \prod_{i=1}^m (\Psi^{(4(k-i)+1)}) \right)^{-1} \times \right. \\ & \times \left. \left(\sum_{j=1}^m \left(\prod_{i=j+1}^{m+1} (\Psi^{(4(m-i+j)+5)}) \right) \times \Omega_{i-1}^{4i-3} + \Omega_m^{4m+1} \right) \right] + \\ & + \sum_{j=1}^k \left(\prod_{i=j+1}^{k+1} (\Psi^{(4(m-i+j)+5)}) \right) \times \Omega_{j-1}^{4j-3} + \Omega_k^{4k+1}. \end{aligned}$$

Определение m -цикла представлено как стробоскопическое сопоставление, используемое для вычисления различных состояний систем через соответствующие итеративные методы (например, Ньютона-Рафсона или Гаусса-Зейделя).

Здесь матрица Якоби для $\Delta\tau_k$ из выражений (9–12) вычисляется так:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{2,4}(\mathbf{X}) = & \\ = & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^1} & \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial U_k^C} \\ \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial i_k^1} & \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial U_k^C} \\ 0 & 0 & \frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial i_k^3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial i_k^1} & \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial U_k^{C1}} & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial i_k^1} & \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial U_k^{C2}} & 0 \\ \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial i_k^1} & \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial U_k^C} \end{bmatrix}_{k=4} \end{aligned}$$

Таким образом, каждый элемент в матрице Якоби $\left(\frac{\partial f_i(\cdot)}{\partial \mathbf{X}} \right)$ определяется как частная производная

элементов системы из уравнения (7):

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^1} = & \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^1} = & f_{11}(\Delta\tau_k) + f'_{12}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^1} + \\ & + i_k^2 f'_{12}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^1} + U_k^C f'_{16}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^1} + \\ & + E_0 g'_1(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^1}; \\ \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^2} = & i_k^1 f'_{11}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^2} + f_{12}(\Delta\tau_k) + \\ & + i_k^2 f'_{12}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^2} + U_k^C f'_{16}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^2} + \\ & + E_0 g'_1(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^2}; \\ \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^3} = & i_k^1 f'_{11}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^3} + i_k^2 f'_{12}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^3} + \\ & + U_k^C f'_{16}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^3} + E_0 g'_1(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{di_k^3}; \\ \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial U_k^{C1}} = & i_k^1 f'_{11}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C1}} + i_k^2 f'_{12}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C1}} + \\ & + U_k^C f'_{16}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C1}} + E_0 g'_1(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C1}}; \\ \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial U_k^{C2}} = & i_k^1 f'_{11}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C2}} + i_k^2 f'_{12}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C2}} + \\ & + U_k^C f'_{16}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C2}} + E_0 g'_1(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^{C2}}; \\ \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial U_k^C} = & i_k^1 f'_{11}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^C} + i_k^2 f'_{12}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^C} + \\ & + U_k^C f'_{16}(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^C} + E_0 g'_1(\Delta\tau_k) \frac{d\Delta\tau_k}{dU_k^C}. \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

Аналогичные зависимости строятся для остальных производных из уравнения (7); здесь их подробно приводить не имеет смысла:

$$f_2(\cdot) = f_{21}(\Delta\tau_k)i_k^1 + f_{22}(\Delta\tau_k)i_k^2 + f_{26}(\Delta\tau_k)U_k^C + g_2E_0;$$

$$\frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial i_k^1} = \dots; \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial i_k^2} = \dots; \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial i_k^3} = \dots;$$

$$\frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial U_k^{c1}} = \dots; \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial U_k^{c2}} = \dots; \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial U_k^C} = \dots;$$

$$f_3(\cdot) = f_{33}(\Delta\tau_k)i_k^3;$$

$$\frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial i_k^1} = \dots; \frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial i_k^2} = \dots; \frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial i_k^3} = \dots;$$

$$\frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial U_k^{c1}} = \dots; \frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial U_k^{c2}} = \dots; \frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial U_k^C} = \dots;$$

$$f_4(\cdot) = f_{41}(\Delta\tau_k)i_k^1 + f_{42}(\Delta\tau_k)i_k^2 + f_{44}(\Delta\tau_k)U_k^{c1};$$

$$\frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial i_k^1} = \dots; \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial i_k^2} = \dots; \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial i_k^3} = \dots;$$

$$\frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial U_k^{c1}} = \dots; \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial U_k^{c2}} = \dots; \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial U_k^C} = \dots;$$

$$f_5(\cdot) = f_{51}(\Delta\tau_k)i_k^1 + f_{52}(\Delta\tau_k)i_k^2 + f_{55}(\Delta\tau_k)U_k^{c2};$$

$$\frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial i_k^1} = \dots; \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial i_k^2} = \dots; \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial i_k^3} = \dots;$$

$$\frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial U_k^{c1}} = \dots; \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial U_k^{c2}} = \dots; \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial U_k^C} = \dots;$$

$$f_6(\cdot) = f_{61}(\Delta\tau_k)i_k^1 + f_{62}(\Delta\tau_k)i_k^2 + f_{66}(\Delta\tau_k)U_k^C;$$

$$\frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial i_k^1} = \dots; \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial i_k^2} = \dots; \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial i_k^3} = \dots;$$

$$\frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial U_k^{c1}} = \dots; \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial U_k^{c2}} = \dots; \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial U_k^C} = \dots$$

Характеристические мультипликаторы вычисляются через нахождение фиксированных точек, соответствующих тому или иному выходному сигналу X [13].

Любой из оговоренных выше численных методов может быть использован с целью нахождения нелинейных градиентов выражения (14) для фиксированных решений линеаризованной системы (7) через линеаризацию нелинейной динамической системы (2).

При использовании метода Ньютона нахождение фиксированной точки записывается как $\mathbf{X} = -\mathbf{A}_i^{-1}\mathbf{B}$, а её итеративное представление как

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - [\mathbf{J}(\mathbf{X}_k)]^{-1} \times \mathbf{f}(\mathbf{X}_k).$$

Итеративный процесс повторяется до тех пор, пока $\|\mathbf{f}(\mathbf{X}_k)\| > \varepsilon$.

Таким образом, решение характеристического уравнения (4) записывается как

$$\det \begin{pmatrix} \lambda - \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^1} & -\frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial U_k^C} \\ -\frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial i_k^1} & \lambda - \frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_2(\cdot)}{\partial U_k^C} \\ 0 & 0 & \lambda - \frac{\partial f_3(\cdot)}{\partial i_k^3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial i_k^1} & -\frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & \lambda - \frac{\partial f_4(\cdot)}{\partial U_k^{c1}} & 0 & 0 \\ -\frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial i_k^1} & -\frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & \lambda - \frac{\partial f_5(\cdot)}{\partial U_k^{c2}} & 0 \\ -\frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial i_k^1} & -\frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial i_k^2} & 0 & 0 & 0 & \lambda - \frac{\partial f_6(\cdot)}{\partial U_k^C} \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} \lambda - a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & a_6 \\ a_7 & \lambda - a_8 & 0 & 0 & 0 & a_{12} \\ 0 & 0 & \lambda - a_{15} & 0 & 0 & 0 \\ a_{19} & a_{20} & 0 & \lambda - a_{22} & 0 & 0 \\ a_{25} & a_{26} & 0 & 0 & \lambda - a_{29} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 & \lambda - a_{36} \end{pmatrix} = 0. \quad (20)$$

Из выражения (20) собственные значения и собственные вектора могут быть получены путем решения определителя. А это возможно, если:

$$(\lambda - a_1)(\lambda - a_8)(\lambda - a_{15})(\lambda - a_{22})(\lambda - a_{29})(\lambda - a_{36}) + a_2a_7(\lambda - a_{15})(\lambda - a_{22})(\lambda - a_{29})(\lambda - a_{36}) = 0;$$

$$\left\{ \begin{aligned} &(\lambda - a_1)(\lambda - a_8) + a_2a_7 \\ &(\lambda - a_{15})(\lambda - a_{22})(\lambda - a_{29})(\lambda - a_{36}) \end{aligned} \right\} = 0.$$

$(\lambda - a_1)(\lambda - a_8) + a_2a_7 = 0$ формируют квадратное уравнение, где

$$\lambda_{1,2} = \frac{(a_1 + a_8) \pm \sqrt{(a_1 + a_8)^2 - 4(a_1a_8 + a_2a_7)}}{2(a_1 + a_8)}.$$

Если собственные числа λ_3 до λ_6 меньше нуля, они имеют действительные и отрицательные корни. Из этого можно сделать вывод, что система находится в стабильном состоянии и уравнение (16) может иметь действительные и мнимые корни (колебательный режим):

$$\lambda_3 = a_{15}, \lambda_4 = a_{22}, \lambda_5 = a_{29}, \lambda_6 = a_{36}.$$

Заключение

Получены множители матрицы Якоби для анализа устойчивости ДППН с ЧИМ.

Использование матрицы Якоби позволяет исследовать проблему поиска решения кусочно-линейной системы дифференциальных уравнений путем интегрирования функций, содержащих разрывы первого рода, что является нетривиальной задачей [17–20].

Способ управления ДППН, основанный на ЧИМ, потребовал разработки математической модели. Были выведены математические выражения, описывающие принципы формирования коммутационной функции при частотной модуляции. Эти принципы были обобщены в форме вычислительного алгоритма поиска решений, в котором производится расчёт матрицы Якоби путём создания стробоскопического отображения Пуанкаре для исходной задачи.

Также реализован алгоритм анализа устойчивости найденного решения, и определены значения мультипликаторов, при которых система имеет устойчивое периодическое колебательное движение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русскин В.А., Семенов С.М., Диксон Р.К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 78–87.
2. Диксон Р.К., Русскин В.А., Семенов С.М. Алгоритм поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя с ПИ-регулятором в солнечном инверторе // Электромеханические преобразователи энергии: матер. VII Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 2015. – Т. 1. – С. 153–157.
3. Русскин В.А., Семенов С.М., Михальченко С.Г. Исследование динамических процессов в повышающем преобразователе напряжения с жесткой и мягкой коммутацией // Промышленная энергетика. – 2015. – № 8. – С. 23–30.
4. Yilser Devrim, Levent Bilir. Performance investigation of a wind turbine-solar photovoltaic panels–fuel cell hybrid system installed at Incek region – Ankara, Turkey // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 126. – № 8. – P. 759–766. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416307361 (дата обращения: 11.11.2016).
5. Neng Zhang, Danny Sutanto, Kashem M. Muttaqi. A review of topologies of three-port DC–DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 56. – № 4. – P. 388–401. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115013465 (дата обращения: 11.11.2016)
6. PWM-Switch Modeling of DC-DC Converters / Edwin van Dijk, Herman J.N. Spruijt, Dermot M. OrSullivan, J. Ben Klaassens // IEEE Transactions on Power Electronics. 1995. – V. 10. – № 6. – P. 659–665.
7. Двухфазный повышающий преобразователь с мягкой коммутацией транзисторов и особенности его динамических свойств / Р.К. Диксон, Ю.Н. Дементьев, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, С.М. Семёнов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 96–101.
8. An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications / S. Sivakumar, M. Jagabar Sathik, P.S. Manoj, G. Sundararajan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 58. – № 5. – P. 1475–1485. URL: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.057 (дата обращения: 11.11.16).
9. Abdullah Abusorrah, Mohammed M. Al-Hindawi, Yusuf Al-Turki. Stability of a boost converter fed from photovoltaic source // Solar Energy. – 2013. – V. 98. – № 12. – P. 458–471. URL: dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.001 (дата обращения: 11.11.16).
10. Ghada Aldahim, Hashem Oirekozek, Ziad Sakka. Impact of Inductor Resistance on the Dynamic Behaviour of a DC–DC Boost Converter Using Bifurcation and Chaos Theory // Advancements in Renewable Energy and Clean Environment: TerraGreen 13 International Conference. – 2013. – V. 36. – P. 1025–1034. URL: dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.117 (дата обращения: 15.09.16)
11. Zhusubaliyev Zh.T., Soukhoterina E.A., Mosekilde E. Border-collision bifurcations and chaotic oscillations in a piecewise-smooth dynamical system // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2001. – V. 11. – № 12. – P. 2977–3001.
12. Tse C.K. Flip Bifurcation and Chaos in Three-state Boost Switching Regulators // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1994. – V. 41. – № 1. – P. 16–23.
13. Гаврилов А. А., Михальченко Г. Я., Михальченко С. Г. Нелинейная динамика преобразователей с многофазной импульсной модуляцией // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Т. 20. – № 3. – С. 171–178.
14. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, А.И. Андриянов, С.Г. Михальченко. – Томск: Изд-во Томского университета систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 294 с.
15. Михальченко Г.Я., Малаханов А.А. Математическая модель однофазного корректора коэффициента мощности // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – Т. 18. – № 2. – Ч. 2. – С. 143–149.
16. High-Feedback Operation of Power Electronic Converters / Zh.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, A.I. Andriyanov, G.Y. Mikhilchenko // Electronics. – 2013. – V. 2. – P. 113–167. URL: mdpi.com/journal/electronics (дата обращения: 15.09.16).
17. Femia N., Spagnuolo G., Vitelli M. Steady-state analysis of hard and soft switching DC-to-DC regulators // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2003. – V. 18. – № 1. – P. 51–64.
18. Combined PWM and PFM control for universal line voltage of a piezoelectric transformer off-line converter / S. Hamamura, T. Ninomiya, M. Yamamoto, M. Katsuno // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2003. – V. 18. – № 1. – P. 270–277.
19. Prasada J.S., Obuleshb Y.P., Babu Ch.Sai. FPGA (Field Programmable Gate Array) controlled solar based zero voltage and zero current switching DC–DC converter for battery storage applications // Energy. – 2016. – V. 106. – № 6. – P. 728–742. URL: dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.002 (дата обращения: 11.11.16).
20. A highly efficient PV system using a series connection of DC–DC converter output with a photovoltaic panel / Ho-sung Kim, Jong-Hyun Kim, Byung-Duk Min, Dong-Wook Yoo, Hee-Je Kim // Renewable Energy. – 2009. – V. 34. – № 11. – P. 2432–2436. URL: dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.011 (дата обращения: 11.11.16).

Поступила 19.12.2016 г.

Информация об авторах

Диксон Р.К., специалист отдела энергетики ЮНЕСКО зоны Карибского бассейна.

Михальченко Г.Я., доктор технических наук, профессор кафедры промышленной электроники Томского Университета Систем Управления и Радиоэлектроники.

Михальченко С.Г., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Русскин В.А., магистрант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Семёнов С.М., старший преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.314.2:632

ISSUES OF LINEARIZATION OF A TWO-PHASE BOOST DC-DC CONVERTER APPLIED IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OPERATING ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Robert C. Dixon¹,
robert_dixon@mail.ru

Gennady Ya. Mikhailchenko²,
kpe-tusur@yandex.ru

Sergey G. Mikhailchenko³,
msg@ie-tusur.ru

Viktor A. Russkin³,
vrsskn@gmail.com

Sergey M. Semenov³,
ssm@tpu.ru

¹ UNESCO Caribbean Energy Division Specialist,
25, Dominica Drive, Kingston 5, JMAKN04, Jamaica.

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Renewable energy resources, for example photovoltaic elements and wind turbines, draw the increasing attention due to energy shortage and depletion of energy sources. Such energy sources usually give low voltage output. So the elementary photovoltaic electric power supply based on silicon gives about 0,7 V EMF, and based on germanium – 0,4 V. However, the possibilities of sequential accumulation of output potential are limited due to the need of increase in parallel branches of solar panels. The solution of this problem led to development of power supply systems on the basis of pulse-width boost converters.

There is a task on improving the efficiency of this type of converters. In particular, to determine stability and research of dynamics in mathematical models of installations of power electronics the Jacobi method is widely applied. While developing the power supply systems of different function the use of the Jacobi matrix increases their energy parameters. At the same time application of function of Poincare for iterative display of the Jacobi method makes it possible to determine the operating modes of the converter for specific points after changing the parameters of the system. Thus, Jacobi matrix, being an dimensionless size, allows linearizing the characteristic in the fixed points for their analysis. Therefore, partial differentiation of nonlinear system gives the opportunity to obtain the fixed values, being the characteristic animator of the system – eigenvalues of a matrix.

All the studies were carried out on the example of two-phase boost dc-dc converter with pulse frequency modulation. The peculiarity of the paper consists in use of the Jacobi matrix for linearizing non-linear systems when studying dynamics to determine steady and unstable modes of functioning of energy converters. Such mathematical approach allows increasing the efficiency and reliability of the voltage converter by identification of the abnormal dynamic operation modes in the device, reducing energy losses, i. e. increasing energy efficiency of a power supply system.

The aim of the research is to develop an alternative method of linearization by using the Jacobi matrix to analyze stability of operation of various converters. The circuit of the studied converter assumes energy accumulation in inductive elements for shutdown at zero current or zero voltage. The results will be introduced in the form of display of Poincare through the Newton–Rafson–Jacobi method.

Methods: review of technical publications, concerned the need of using Jacobi matrixes to analyze various converters stability. The control algorithm of two-phase pulse converter is simulated in LTSpice and MATLAB. The analysis of appropriate characteristics of TPBC includes Jacobi and Newton–Rafson methods. The latter has rather fast convergence and fine precision of discrete values. It is shown below in chaos and bifurcation modes.

Results. The obtained eigenvalues define the operation modes of management system of TPBC, developed on the basis of the two-phase pulse converter. These results will help to reveal those parameters of the system in case of which it functions in normal or abnormal statuses, thereby will allow separating one modes of functioning from others, and thus increasing reliability and efficiency of the system.

Key words:

Eigenvalues, Jacobi matrix, Poincare's display, analysis of stability, non-linear dynamic system, Newton–Rafson method.

REFERENCES

1. Russkin V.A., Semenov S.M., Dixon R.C. Study of maximum power point tracking algorithms for boost DC-DC converter of solar inverter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 78–87. In Rus.
2. Russkin V.A., Semenov S.M., Dixon R.C. Algorithm of search of a maximum power point for boost DC-DC converter with the PI-regulator in the solar inverter. *Electromechanical Converters of Energy. Materials of the VII international scientific and technical conference*. Tomsk, 2015. Vol. 1, pp. 153–157.

3. Russkin V.A., Semenov S.M., Mikhailchenko S.G. Research of dynamic processes in the Boost DC-DC converter with hard and soft switching. *Industrial power engineering*, August 2015, vol. 8, pp. 23–30. In Rus.
4. Yilser Devrim, Levent Bilir. Performance investigation of a wind turbine–solar photovoltaic panels–fuel cell hybrid system installed at Incek region – Ankara, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 126, no. 8, pp. 759–766. Available at: sciedirect.com/science/article/pii/S0196890416307361 (accessed 11 November 2016)
5. Neng Zhang, Danny Sutanto, Kashem M. Muttaqi. A review of topologies of three-port DC–DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 56, no. 4, pp. 388–401. Available at: sciedirect.com/science/article/pii/S1364032115013465 (accessed 11 November 2016).
6. Van Dijk E., Spruijt Herman J.N., OrSullivan D.M., Klaasens J.B. PWM-Switch Modeling of DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, vol. 10, no. 6, pp. 659–665.
7. Dixon R.C., Dementyev Yu.N., Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G., Semenov S.M. Dynamic properties of a two-phase boost converter with soft-switching transistors technology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 96–101. In Rus.
8. Sivakumar S., Sathik M.J., Manoj P.S., Sundararajan G. An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, no. 5, pp. 1475–1485. Available at: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.057 (accessed 11 November 2016)
9. Abdullah Abusorrah, Mohammed M. Al-Hindawi, Yusuf Al-Turki. Stability of a boost converter fed from photovoltaic source. *Solar Energy*, 2013, vol. 98, no. 12, pp. 458–471. Available at: dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.001 (accessed 11 November 2016).
10. Ghada Aldahim, Hashem Oirekozek, Ziad Sakka. Impact of Inductor Resistance on the Dynamic Behaviour of a DC–DC Boost Converter Using Bifurcation and Chaos Theory. *Advancements in Renewable Energy and Clean Environment: TerraGreen 13 International Conference*, 2013, vol. 36, pp. 1025–1034. Available at: dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.117 (accessed 15 September 2016).
11. Zhusubaliyev Zh.T., Soukhoterin E.A., Mosekilde E. Border-collision bifurcations and chaotic oscillations in a piecewise-smooth dynamical system. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2001, vol. 11, no. 12, pp. 2977–3001.
12. Tse C.K. Flip Bifurcation and Chaos in Three-state Boost Switching Regulators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1994, vol. 41, no. 1, pp. 16–23.
13. Gavrilov A.A., Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G. Nonlinear dynamics of semiconductor power converters with multiphase modulation. *Journal TUSUR*, 2009, vol. 20, no. 3, pp. 171–178. In Rus.
14. Kobzev A.V., Mikhailchenko G.Ya., Andriyanov A.I., Mikhailchenko S.G. *Nelineynaya dinamika poluprovodnikovkh preobrazovateley* [Nonlinear dynamics of semiconductor in power electronics converters]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Press, 2007. 294 p.
15. Mikhailchenko G.Ya., Malakhanov A.A. A mathematical model of a single-phase power factor corrector. *Journal TUSUR*, 2008, vol. 18, no. 2, pp. 143–149. In Rus.
16. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E., Andriyanov A.I., Mikhailchenko G.Y. High-Feedback Operation of Power Electronic Converters. *Electronics*, 2013, vol. 2, pp. 113–167. Available at: mdpi.com/journal/electronics (accessed 15 September 2016).
17. Femia N., Spagnuolo G., Vitelli M. Steady-state analysis of hard and soft switching DC-to-DC regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 51–64.
18. Hamamura S., Ninomiya T., Yamamoto M., Katsuno M. Combined PWM and PFM control for universal line voltage of a piezoelectric transformer off-line converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 270–277.
19. Prasada J.S., Obuleshb Y.P., Babu Ch.Sai. FPGA (Field Programmable Gate Array) controlled solar based zero voltage and zero current switching DC–DC converter for battery storage applications. *Energy*, 2016, vol. 106, no. 6, pp. 728–742. Available at: dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.002 (accessed 11 November 2016).
20. Ho-sung Kima, Jong-Hyun Kimb, Byung-Duk Min, Dong-Wook Yoo, Hee-Je Kim. A highly efficient PV system using a series connection of DC–DC converter output with a photovoltaic panel. *Renewable Energy*, 2009, vol. 34, no. 11, pp. 2432–2436. Available at: dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.011 (accessed 11 November 2016).

Received: 19 December 2016.

Information about the authors

Robert C. Dixon, expert, UNESCO Caribbean Energy Division.

Gennady Ya. Mikhailchenko, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Sergey G. Mikhailchenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor A. Russkin, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey M. Semenov, senior teacher, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.83.016

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Долгаль Александр Сергеевич¹,

dolgal@mi-perm.ru

Христенко Людмила Анатольевна¹,

liudmila.hristenko@yandex.ru

¹ Учреждение Российской академии наук «Горный институт Уральского отделения РАН»,
Россия, 620007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А.

Актуальность исследований обусловлена целесообразностью использования передовых математических методов при обработке результатов полевых геофизических наблюдений.

Цель работы: повышение эффективности методов прикладной геофизики за счет адаптивного выделения информативных составляющих физических полей с использованием эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD).

Метод исследований: декомпозиция профильных геофизических данных, при которой в ходе итерационного вычислительно-го процесса адаптивно выделяются ортогональные разночастотные компоненты сигнала (EMD), которые называются эмпирическими модовыми функциями (IMF). Метод предназначен для частотного представления нестационарных сигналов, его отличительной особенностью является отсутствие априорно заданного функционального базиса разложения. Предлагается оригинальный алгоритм, в котором для построения функций, огибающих экстремумы анализируемого сигнала, используется истокообразная аппроксимация, а остаток при разложении может отождествляться с фоновой составляющей поля.

Результаты. Алгоритм EMD программно реализован и апробирован на практических материалах при обработке данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки. Установлена возможность применения метода с целью выделения информативной компоненты в результатах электропрофилирования (Пермский край); независимой оценки качества высокоточной гравиметрической съемки (Западный Саян); определения составляющей магнитного поля, обусловленной влиянием резко расчлененного рельефа земной поверхности в условиях развития эффузивных траппов (Норильский район). В последнем случае используется построение серии регрессионных зависимостей между разночастотными составляющими магнитного поля и высот. Сделан вывод о целесообразности использования метода эмпирической модовой декомпозиции в области прикладной геофизики. Перспективы применения EMD авторы видят в возможности анализа материалов геофизического мониторинга разрабатывающихся месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова:

Сигнал, эмпирическая модовая декомпозиция, алгоритм, аппроксимация, составляющая поля, гравиразведка, магниторазведка, электроразведка.

Введение

Метод эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD) был предложен Норденом Хуангом в 1995 г. и первоначально использовался при изучении поверхностных волн тайфунов. В 1998 г. метод был обобщен применительно к анализу произвольных временных рядов [1]. Метод является важнейшей составляющей преобразования Гильберта–Хуанга (Huang–Hilbert Transform – ННТ), получившего в дальнейшем широкое применение в различных областях науки и техники [2–5 и др.], наряду с преобразованием Фурье [6] и вейвлет-анализом [7]. В области геофизики известны примеры успешного использования ННТ и EMD при анализе сейсмической активности и землетрясений [8], анализе структуры сейсмических сигналов [9, 10], изучении сейсмоакустической эмиссии горных пород [11], подавлении помех в каротажных данных [12], обработке материалов аэрогравиметрических исследований [13].

В методе EMD предполагается, что анализируемый сигнал состоит из серии составляющих с различными частотами (intrinsic mode functions – IMF), обладающих следующими свойствами: 1) число максимумов и минимумов функции, а также и

количество пересечений нуля отличаются не более, чем на единицу; 2) среднее значение огибающих, построенных по локальным максимумам и локальным минимумам, близко к нулю. В отличие от гармоник, получаемых при представлении дискретного сигнала рядом Фурье, каждая IMF может иметь переменную амплитуду и частоту в разные моменты времени t (или в разных точках пространства x).

Для геофизических полей характерна нестационарность, т. е. естественное изменение их статистических характеристик в пространстве [14]. Природа этих изменений различна, и, в частности, может быть связана с фрактальными особенностями полей, обладающих самоподобной иерархически упорядоченной структурой [15]. EMD может широко применяться для анализа нестационарных данных, т. е. является адекватным геофизической практике, в отличие от большинства известных методов. Несмотря на еще недостаточно разработанное теоретическое обоснование, можно полностью согласиться с тем, что «метод эмпирических мод выступает в роли нового альтернативного (и также обладающего широкими возможностями) инструмента исследования структуры сложных сигналов» [16].

В данной статье предлагается модификация метода EMD, ориентированная на обработку геофизических данных. Отличительной особенностью ее является использование гармонических (потенциальных) функций при построении огибающих сигнала вместо традиционно применяющихся для этой цели кубических сплайнов.

Алгоритм EMD и его программная реализация

Возьмем значения $f(x)$ геофизического поля (сигнал), полученные в k точках наблюдений на профиле с постоянным шагом Δx . Выделим все максимумы и минимумы сигнала и проведем через эти точки огибающие $p(x)$ и $q(x)$, соответственно. Теперь для всех k точек можно определить функцию средних значений $\varphi(x)=[p(x)+q(x)]/2$. Разность $\psi(x)$ между $f(x)$ и $\varphi(x)$ будет являться первым приближением IMF 1 (рис. 1) – первой компонентой отсеивания (*sifting*).

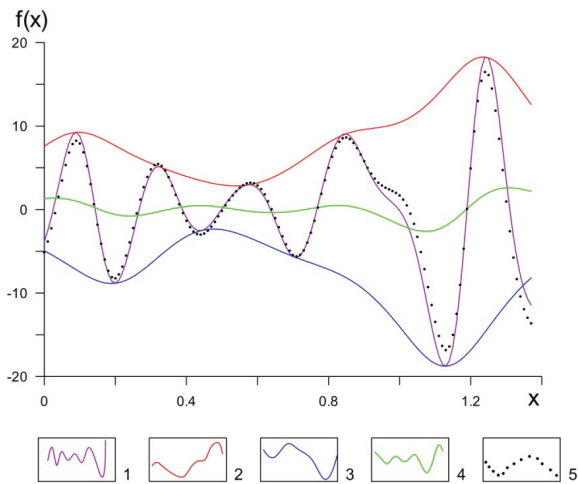


Рис. 1. Построение первого приближения IMF 1: 1 – сигнал $f(x)$; огибающие: 2 – $p(x)$, 3 – $q(x)$; функции: 4 – $\varphi(x)$, 5 – $\psi(x)$

Fig. 1. Construction of the first approximation to the IMF 1: 1 is the $f(x)$ signal; envelopes: 2 – $p(x)$, 3 – $q(x)$; functions: 4 – $\varphi(x)$, 5 – $\psi(x)$

Для дальнейшей записи введем нижние индексы $i=1, 2, \dots, m$, отвечающие вычисляемой IMF (а также функции $\varphi(x)$) и номеру $j=1, 2, \dots, n$ ее приближения. Теперь охарактеризованное выше первое приближение к IMF 1 – это $\psi_{1,1}(x)=f(x)-\varphi_{1,1}(x)$. Процесс уточнения каждой IFM (отсеивание: внутренний итерационный цикл по j) выглядит следующим образом:

$$\psi_{i,j+1}(x) = \psi_{i,j}(x) - \varphi_{i,j}(x), \quad 1 \leq j \leq n. \quad (1)$$

Критерием его завершения является выполнение условия:

$$\frac{\sum_k [\psi_{i,j}(x) - \psi_{i,j-1}(x)]^2}{\sum_k [\psi_{i,j-1}(x)]^2} \leq \delta, \quad (2)$$

где δ – заданная погрешность или осуществление требуемого числа итераций n . Таким образом, фак-

тически выполняемое число итераций составляет $n=n(\delta)$. В результате отсеивания будет получена IMF 1. Для построения IMF 2 нужно будет организовать новый цикл (1), используя теперь в качестве исходных данных разность сигнала и уже имеющейся модовой функции: $\psi_{2,1}=f(x)-\psi_{1,n}$. Дальнейшее вычисление всех IMF (разложение: внешний итерационный цикл по i) проводится на основе последовательного исключения из сигнала всех предыдущих модовых функций:

$$\psi_{i+1,1} = \psi_{i-1,n} - \psi_{i,n}, \quad 2 \leq i \leq m. \quad (3)$$

Для решения многих геофизических задач характерно наличие фоновой компоненты в анализируемом сигнале. Поэтому для останова внешнего цикла (3) используется критерий, предполагающий высокую гладкость остатка $r(x)=\psi_{m+1,1}(x)$: вычисления прекращаются, если функция $r(x)$ имеет меньше двух максимумов и меньше двух минимумов. Таким образом, после проведения всех циклов просеивания (1) и разложения (3) исходный сигнал удастся представить в виде суммы всех IMF и остаточной составляющей:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \psi_{i,n}(x) + r(x). \quad (4)$$

Сигнал $f(x)$, согласно (4), оказывается разложенным по отвечающему исходным данным конечному адаптивному базису, не имеющему аналитического описания. Этот базис является полным, ортогональным и, по мнению Н. Хуанга, единственным [17].

Важнейшим элементом процесса эмпирической модовой декомпозиции является построение огибающих сигнала $p(x)$ и $q(x)$. Для этой цели широко используются кубические сплайны, также апробировано применение В-сплайнов [18]. Однако методы сплайн-интерполяции нередко вносят заметные искажения в краевые части сигнала, для уменьшения которых в данной статье предлагается использование истокообразной аппроксимации при вычислении огибающих $p(x)$ и $q(x)$. Алгоритм состоит в следующем: первоначально определяются координаты x точек локальных экстремумов анализируемой функции $f(x)$ (или $\psi(x)$) и значения этих экстремумов. Предположим, что имеется t_1 значений амплитуды h_1 максимумов и t_2 значений амплитуды h_2 минимумов.

Можно рассчитать наибольшее расстояние x_{\max} между соседними парами максимумов и аппроксимировать огибающую $p(x)$ линейной комбинацией гармонических функций:

$$p(x) \cong \sum_{i=1}^{t_1} b_i z / [(x_i - x)^2 + z^2], \quad (5)$$

где b_i коэффициенты, определяемые в процессе аппроксимации; z – константа; x_i – абсциссы локальных максимумов. Правая часть выражения (5) представляет собой гравитационный эффект совокупности бесконечно длинных горизонтальных стержней, размещенных на глубине z под точками

$x_i, i=1, 2, \dots, t_1$, обладающих линейными массами, пропорциональными b_i [19]. Значения коэффициентов b_i определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) методом Зейделя:

$$\mathbf{A}\mathbf{b}=\mathbf{c}, \quad (6)$$

где \mathbf{A} – матрица коэффициентов вида $z/[(x_i-x)^2+z^2]$ размером t_1 строк, t_1 столбцов; $\mathbf{b}=\{b_i\}$ – вектор неизвестных параметров; $\mathbf{c}=\{h_i\}$ – вектор максимальных значений функции $f(x)$ или $\psi(x)$. Выбор константы $0,5x_{\max} \leq z \leq 2x_{\max}$ обеспечивает устойчивость вычислений и высокую точность аппроксимации [20, 21]. Сходимость метода обусловлена тем, что матрица \mathbf{A} является симметричной, положительно определенной и наделена свойством диагонального преобладания. Качество аппроксимации контролируется в метрике Чебышева:

$$\max_{1 \leq i \leq t_1} |h_i(x_i) - p(x_i)| \leq \varepsilon_0, \quad (7)$$

где ε_0 – достаточно малая положительная величина.

Построение огибающей по минимумам $q(x)$ осуществляется аналогично, в соответствии с формулами (5)–(7), при замене в них $p(x)$ на $q(x)$, t_1 на t_2 , h_1 на h_2 . Полученные аналитические выражения (5) для двух огибающих используются при вычислении функции средних значений $\rho(x)$ во всех k точках оси x . Высокую точность построения огибающих $p(x)$ и $q(x)$, а также незначительные искажения в краевых частях профиля иллюстрирует рис. 1.

Вышеописанный алгоритм эмпирической модовой декомпозиции реализован авторами в программе RIMF, созданной с использованием системы визуального объектно-ориентированного программирования DELPHI 8.0. В программе используются следующие параметры: максимальное количество эмпирических мод $m \leq 15$; показатель качества аппроксимации $\varepsilon_0 \leq 10^{-4}L$, где L – размах аппроксимируемой функции; пользователем задаются максимальное число циклов отсеивания n (по умолчанию $n \leq 7$ и погрешность (3) приближенного построения IMF (по умолчанию $\delta \leq 0,01$). Как правило, для достижения условия (7) требуется не более 20–30 итераций при решении СЛАУ (6). Затраты времени на декомпозицию данных аэромагнитной съемки, заданных в $k=601$ точках, при $i=7$ и суммарном количестве циклов просеивания $\Sigma n=43$, на компьютере с процессором Intel (R) Core (TM) i7-4770K с тактовой частотой 3,5 ГГц составляют ~10 с.

Примеры применения метода

Рассмотрим фильтрационные возможности алгоритма EMD на примере данных электропрофилеирования методом срединного градиента, с питающей линией АВ=400 м и приемной линией MN=10 м, проведенного с целью решения инженерно-геологических задач в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (Пермский край). Профиль наблюдений включает 138 точек, шаг между точками 10 м. Полученные в результате полевых измерений значения кажущегося электрического сопротивления ρ_x , лежа-

щие в диапазоне от 0,7 до 129 Ом (рис. 2, а), в результате декомпозиции были разложены на шесть IMF и остаток $r(x)$. С целью подавления помех использовалось усреднение в скользящем окне размером 7 точек (рис. 2, б) и синтез полезного сигнала (рис. 2, в), отождествляющегося в данном случае с суммой IMF с номерами 3, 4, 5, 6 и остаточной компоненты $r(x)$. Как очевидно, в последнем случае результирующий график является более гладким, при этом не происходит потери информации на участках длиной 30 м в начале и конце профиля.

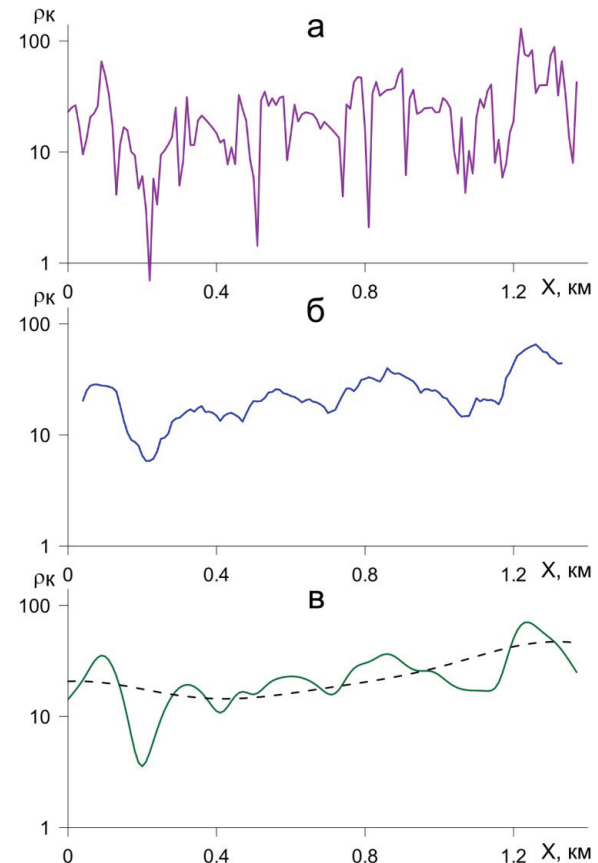


Рис. 2. Графики кажущегося электрического сопротивления: а) результаты измерений; сглаженные значения, полученные с помощью: б) осреднения в скользящем окне; в) суммирования нескольких IMF и остатка $r(x)$. Примечание: черная пунктир – остаток $r(x)$

Fig. 2. Graphs of apparent electrical resistance: а) the results of the measurements; smoothed values are obtained by: б) averaging in a sliding window; в) using summation of multiple IMF and the residue $r(x)$. Note: the remainder $r(x)$ is marked with the black dashed line

Метод эмпирической модовой декомпозиции можно применять для приближенной оценки уровня аппаратных и геологических помех в результатах геофизических съемок. Приведем пример подобной оценки по результатам высокоточной гравиметрической съемки масштаба 1:25000, выполненной в Западном Саяне гравиметрами Autograv CG-5 (Scintrex, Канада) с привязкой гравиметрических пунктов при помощи спутниковой системы GPS Trimble-4700 и электронных тахео-

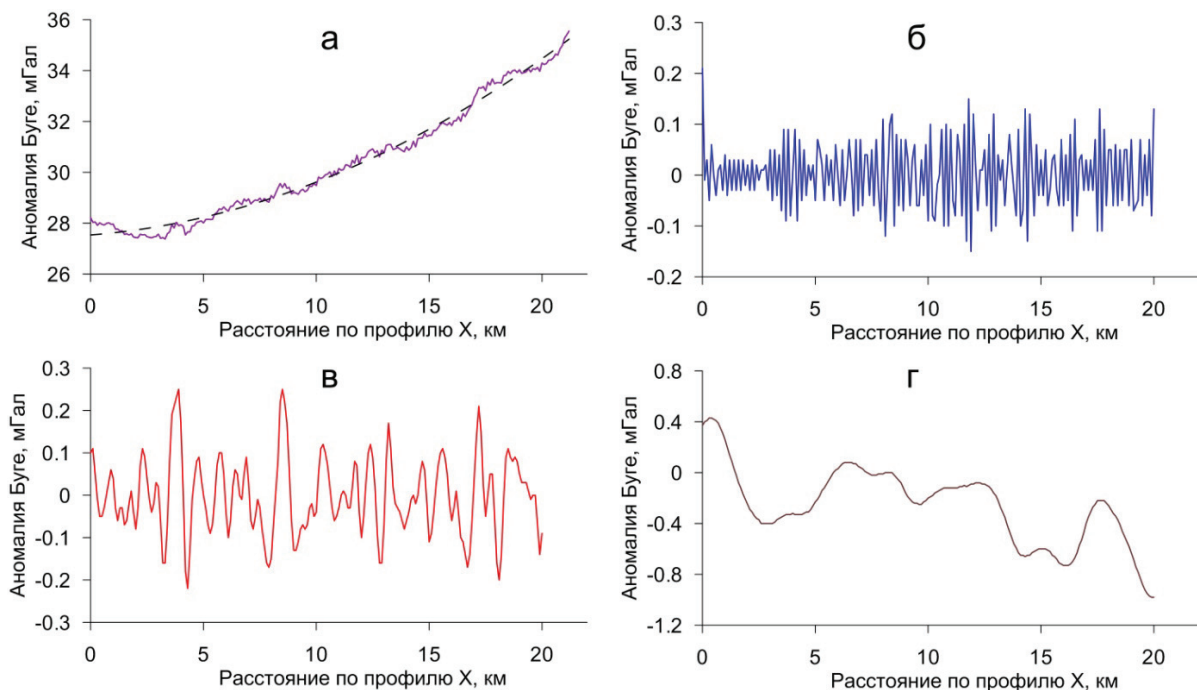


Рис. 3. Аномалии силы тяжести и их региональная компонента (а); выделенные методом EMD составляющие, отвечающие: погрешности гравиметрической съемки (б), помехам геологической природы (в), изучаемым геоплотностным неоднородностям (г)

Fig. 3. Gravity anomalies and their regional component (a); components allocated by the EMD method meet: the error of the gravity survey (б), the nature of geological objects (в), the geo-density inhomogeneities (г)

метров с целью поисков медно-молибденового оруденения. Интерполяционный гравиметрический профиль, пересекающий участок работ в широтном направлении, включает в себя 200 точек измерений. Расстояние между точками 100 м. Перепад значений аномального гравитационного поля Δg составляет более 7 мГал, его значения осложнены региональным фоном, для исключения которого использовалась аппроксимация полиномом 2-й степени: $\Delta g_{\text{рег}} = -27,535 + 0,069x + 0,014x^2$ (рис. 3, а). Локальная составляющая поля содержит 5 эмпирических мод. IMF 1 – это наиболее высокочастотная составляющая локальной компоненты поля $\Delta g_{\text{лок}} = \Delta g - \Delta g_{\text{рег}}$, обусловленная погрешностью съемки (рис. 3, б). Ее статистическое распределение близко к нормальному (рис. 4), математическое ожидание $M = 0,002$, среднее квадратическое отклонение (СКО) составляет $\pm 0,067$ мГал. Эта величина близка к среднее квадратическое отклонение определения аномалии Буге, которая составляет $\pm 0,092$ мГал (с учетом погрешностей наблюдений, планово-высотной привязки и вычисления поправок за влияние рельефа местности). Сумма двух следующих IMF: $\psi_2 + \psi_3$, предположительно отражает влияние помех геологического происхождения (рис. 3, в). СКО этой компоненты $\pm 0,091$ мГал. Полезный сигнал, представленный на рис. 3, г, синтезирован путем суммирования остальных компонент разложения локальной составляющей поля $\psi_4 + \psi_5 + r$.

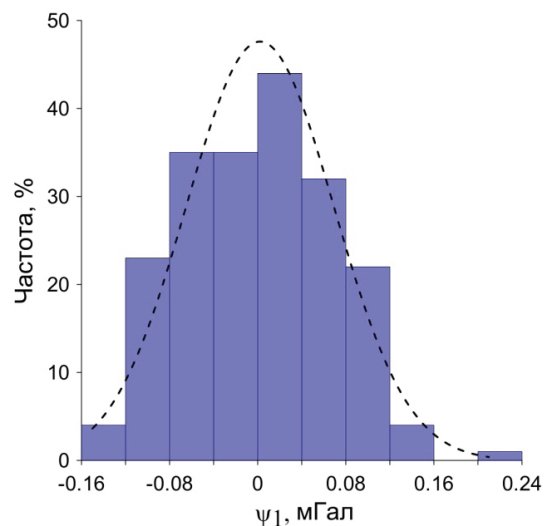


Рис. 4. Статистическое распределение значений IMF 1 и его аппроксимация законом Гаусса (черный пунктир)

Fig. 4. Statistical distribution of IMF 1 values and its approximation by the Gaussian (black dotted line)

При моделировании геологического строения по ряду профилей с использованием монтажного метода решения обратной задачи гравиразведки [21] среднее квадратическое расхождение наблюдаемого и модельного полей составляло 0,2–0,25 мГал, что хорошо согласуется с представленными выше оценками помех.

Скрытые особенности взаимосвязи геофизических полей и аномалиеобразующих геологических объектов можно пытаться выявить на основе применения метода EMD. В определенных диапазонах пространственных частот эти особенности могут проявляться достаточно отчетливо, поэтому целесообразно проводить сопоставление IMF, характеризующих аномалии и их источники. Рассмотрим один пример такого сопоставления, выполненного с целью приближенного учета влияния рельефа земной поверхности на результаты крупномасштабной аэромагнитной съемки, выполненной в Норильском районе НФ ВСЕГЕИ в 2012–2013 гг.

Широко развитая на территории съемки туфолава толща, максимальная мощность которой превышает 3000 м, является главной помехой при поисках рудоносных интрузий геофизическими методами [23]. По направлению (знаку) естественной остаточной намагниченности I_n туфолава толща разделяется на три неравномерные части. Нижняя отвечает только породам ивакинской свиты. Верхняя включает два верхних потока базальтов самоедской свиты, намагниченных отрицательно. Остальная часть разреза намагничена положительно. Суммарная намагниченность $I_{\text{эф}}$ туфолава толщи Норильского района равна 333×10^{-2} А/м при следующих значениях средневзвешенной суммарной намагниченности отдельных свит, А/м: ивакинская – 40×10^{-2} , сыверминская – 43×10^{-2} , гудчихинская вместе с хаканчанской – 107×10^{-2} , туклонская – 78×10^{-2} , надеждинская – 192×10^{-2} , моронговская – 412×10^{-2} , мокулаевская – 207×10^{-2} , хараелахская – 616×10^{-2} , кумгинская – 629×10^{-2} , самоедская – 527×10^{-2} . Влияние резко расчлененного рельефа местности, сложенного интенсивно намагниченными горными породами, выражается в пространственной корреляции повышений амплитуды аномального магнитного поля с увеличением высотных отметок. Однако, в силу сложной физико-геологической обстановки, зависимость магнитного поля от высоты носит нелинейный характер и для его редуцирования используются достаточно сложные технологии, аналогичные вычислению поправок за влияние рельефа в гравиразведке. В разные годы Г.Г. Ремпелем (СНИИГГиМС), В.Н. Юровских (СЕНФЭ), П.В. Кирплюком (НФ ВСЕГЕИ), А.С. Долгалем (Таймыргеолком) были разработаны оригинальные методы определения магнитных аномалий, обусловленных рельефом дневной поверхности, приближенно учитывающие латеральную изменчивость намагниченности трапповых образований.

В приведенном примере значения аномального геомагнитного поля ΔT заданы по широтному профилю длиной 60 км, пересекающему Талнахское месторождение медно-никелевых руд. Амплитуда поля меняется от –627 до 512 нТл, шаг между точками 100 м (рис. 5).

В результате модовой декомпозиции для магнитного поля над туфолава толщей было полу-

чено 7 IMF, для высотных отметок рельефа – 4 IMF. Характеристика этих функций представлена в виде диаграмм Тьюки («ящик с усами»), приведенных на рис. 6. Взаимосвязь между модальными компонентами поля и рельефа отражает таблица парных коэффициентов линейной корреляции (таблица).

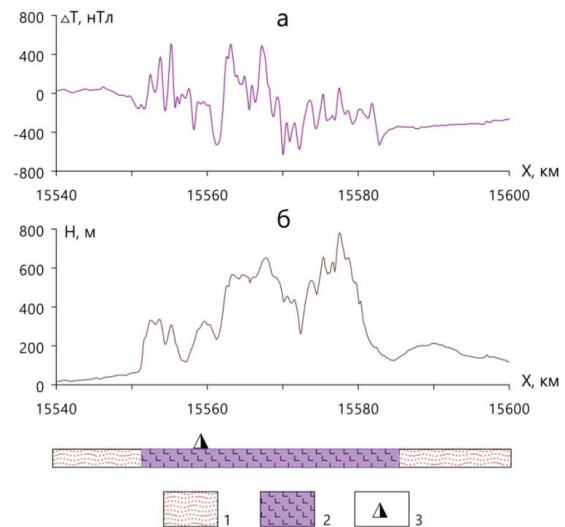


Рис. 5. Аномальное магнитное поле (а) и рельеф земной поверхности (б): 1 – осадочные породы; 2 – туфолава толща; 3 – Талнахское месторождение

Fig. 5. Anomalous magnetic field (a) and topography (b): 1 – are the sediments; 2 – strata of tuffs and lavas; 3 is the Talnakh Deposit

Более 50 % коэффициентов корреляции K не являются значимыми. Значимость оценивалась с помощью t -критерия Стьюдента для доверительной вероятности 99,9 % ($\nu=339$). В целом между высотами H и магнитным полем ΔT отмечается слабая корреляционная связь ($K=0,295$), однако взаимосвязь между IMF этих параметров является более тесной (значения K достигают 0,976). Это позволяет построить регрессионные уравнения вида $\psi_i(\Delta T) = A + B\psi_j(H)$, $1 \leq i \leq 7$, $1 \leq j \leq 4$ и рассчитать с их помощью 7 разночастотных составляющих магнитного поля, связанных с изменением высот земной поверхности. Сумма этих составляющих по своему физическому смыслу будет отвечать влиянию неоднородно намагниченного рельефа туфолава толщи, т. е. являться поправкой за влияние рельефа δT_p . Полученные значения δT_p достаточно хорошо согласуются с независимыми результатами вычисления поправок за влияние рельефа местности, полученными путем решения прямой задачи магниторазведки (рис. 7). При этом использовалась детальная цифровая модель высот рельефа с переменной по латерали намагниченностью $J = J(x, y)$, радиус учета влияния рельефа составлял 20 км [24]. Следует отметить, что оба способа расчета поправок δT_p являются приближенными, но предложенный авторами способ, базирующийся на EMD, требует значительно меньших трудозатрат.

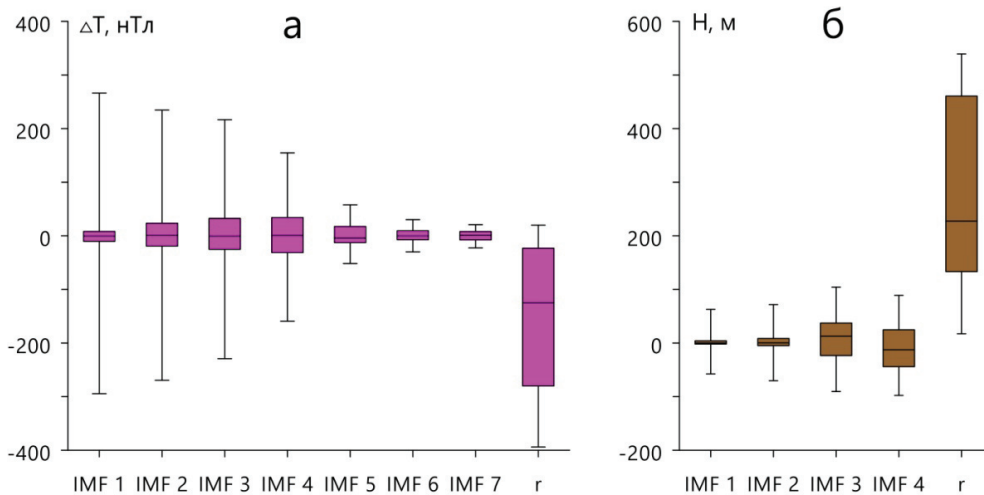


Рис. 6. Диаграммы Тьюки для магнитного поля (а) и высот рельефа местности (б)

Fig. 6. Tukey diagrams for the magnetic field (a) and heights of the terrain (б)

Таблица. Парные коэффициенты линейной корреляции K между магнитным полем ΔT , высотами рельефа H и компонентами их разложения ψ, r

Table. Paired coefficients of linear correlation K between the magnetic field ΔT , the height H and the components of decomposition

Параметры/Parameters	ΔT	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	ψ_5	ψ_6	ψ_7	r
H	0,295	0,078	0,092	0,171	0,314	0,433	0,450	0,209	-0,076
ψ_1	0,224	0,644	0,141	0,0193	-0,030	-0,095	-0,104	-0,129	-0,043
ψ_2	0,338	0,082	0,614	0,235	-0,117	0,011	0,028	0,012	0,075
ψ_3	0,317	-0,029	0,110	0,303	0,083	0,354	0,304	-0,014	0,184
ψ_4	0,546	-0,105	-0,076	0,168	0,727	0,976	0,947	0,674	0,167
r	-0,092	0,052	-0,053	-0,026	0,093	0,009	0,063	-0,003	-0,268

Примечание: жирным шрифтом выделены компоненты магнитного поля ΔT , для которых составлены уравнения линейной регрессии.

Note: the components of the magnetic field ΔT with the regression equations are in bold.

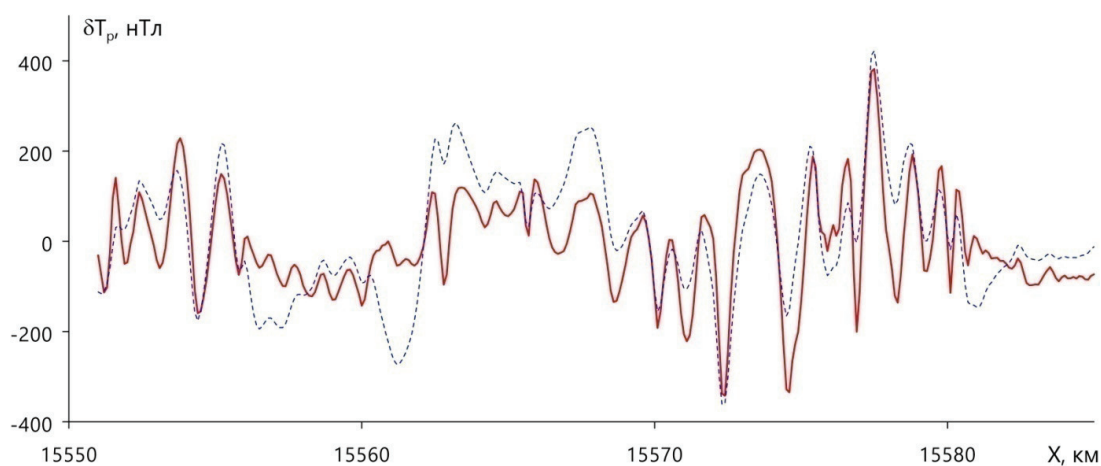


Рис. 7. Магнитное поле δT_p над туфолововой толщей, обусловленное влиянием рельефа местности, определенное с использованием метода EMD (красная линия) и решения прямой задачи магниторазведки (синяя пунктирная линия)

Fig. 7. Magnetic field δT_p above the strata of tuffs and of lavas, due to the influence of the terrain, determined using the EMD method (red line) and solution of the direct problem of magnetometry (blue dotted line)

Заключение

Представленные в статье теоретические и практические материалы позволяют сделать вывод о целесообразности применения метода эмпи-

рической модовой декомпозиции при анализе геофизических данных. Использование адаптивного базиса разложения сигнала в ряде случаев позволяет выделить его физически значимые

компоненты, отвечающие влиянию отдельных факторов. В частности – наиболее высокочастотную компоненту гравитационного поля (IMF 1) можно сопоставить с погрешностью определения аномалий Буге. Выделение информативных составляющих осложненных помехой геофизических полей осуществляется путем суммирования нескольких модовых функций ψ_i с номерами $2 \leq i \leq m$, где m – номер последней IMF, полученной в процессе разложения сигнала. В данной реализации алгоритма EMD остаток r отвечает региональному фону (например, влиянию глубинных источников поля).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1998. – Т. 454. – P. 903–995.
2. Huang N.E., Samuel S.S.P. Hilbert–Huang Transform and its applications. – Singapore: World Scientific Publishing Co, 2005. – 323 p.
3. Ястребов И.П. О свойствах и применениях преобразования Гильберта–Хуанга // Проектирование и технология электронных средств. – 2016. – № 1. – С. 26–33.
4. Нежевенко Е.С., Феоктистов А.С. Преобразование Гильберта–Хуанга двумерных изображений и использование его для выделения текстурных признаков // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы международной научной конференции. – Красноярск, Россия, 23–26 сентября 2014. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 200–203.
5. Сафуллин Н.Т. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга–Гильберта: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 193 с.
6. Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical Methods and Software Cleve Moler and Stephen Nash. – Englewood Clis: Prentice-Hall, 1989. – 495 p.
7. Dremim I.M., Ivanov O.V., Nechitailo V.A. Wavelets and their uses // Physics-Uspekhi. – 2001. – V. 44. – № 5. – P. 447–478.
8. Huang N.E., Wu Z. A review on Hilbert–Huang transform: Method and its applications to geophysical studies // Rev. Geophys. – 2008. – 46. – RG2006. DOI: 10.1029/2007RG000228.
9. Павлов А.Н., Филатова А.Е. Метод эмпирических мод и вейвлет фильтрация: применение в задачах геофизики // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2011. – Т. 19. – № 1. – С. 3–13.
10. Долгих Л.А. Выделение информативной составляющей сейсмоакустического сигнала: возможные подходы // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Тр. междунар. науч. техн. конф. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. – С. 322–323.
11. Иванов Д.Б., Бабуркина М.А. Анализ изменения частотного состава сигналов естественной и вызванной сейсмоакустической эмиссии // Двенадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – С. 86–90.
12. Давыдов В.А., Давыдов А.В. Управление эмпирической модовой декомпозицией сигналов при анализе и обработке геофизических данных // Каротажник. – 2010. – № 5. – С. 98–114.
13. Hassan H.H., Peirce J.W. Empirical Mode Decomposition (EMD) of potential field data: airborne gravity data as an example // Recorder. – January 2008. – V. 33. – № 01. – P. 25–30. URL: <http://csegrecorder.com/articles/view/empirical-mode-decomposition-emd-of-potential-field-data/> (дата обращения 27.10.2016).
14. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: РГГУ, 2008. – 112 с.
15. Блох Ю.И. Проблема адекватности интерпретационных моделей в гравиразведке и магниторазведке // Геофизический вестник. – 2004. – № 6. – С. 10–15.
16. Ульянова Ю.Е., Бабенко Р.Г., Чернов А.В. Частотно-временные преобразования, используемые в цифровой обработке сигналов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 3 (16). – С. 36–42.
17. Давыдов В.А., Давыдов А.В. Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта–Хуанга // Электронное научное издание «Актуальные инновационные исследования: наука и практика». – 2010. – № 1. URL: http://www.actualresearch.ru/nm/2010_1/Article/geo/davydov.htm (дата обращения 17.10.2016).
18. Chen Q., Huang N., Riemenschneider S. A B-spline approach for empirical mode decomposition // Adv. Comp. Math. – 2004. – № 24. – P. 171–195.
19. Гравиразведка: справочник геофизика / под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. – М.: Недра, 1990. – 607 с.
20. Strakhov V.N., Stepanova I.E. The S-Approximation Method and its Application to Gravity Problems // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2002. – V. 38. – № 2. – P. 91–107.
21. Effective Algorithms for Sourcewise Approximation of Geopotential Fields / P.I. Balk, A.S. Dolgal, A.V. Pugin, A.V. Michurin, A.A. Simanov, A.F. Sharkhimullin // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2016. – V. 52. – № 6. – P. 896–911.
22. Balk P.I., Dolgal A.S. Three-dimensional assembly technologies for the interpretation of gravimetric data // Doklady Earth Sciences. – 2009. – V. 427. – № 2. – P. 971–974.
23. Dolgal A.S., Chekhovich K.M. Complex interpretation of geopotential fields on searches for copper-nickel-platinum metallization (Norilsk region) // Geologiya i geofizika. – 1998. – V. 39. – № 11. – P. 1615–1625.
24. Долгаль А.С. Магниторазведка: компьютерные технологии учета влияния рельефа местности. – Пермь: Перм. гос. нац. иссл.-ед. ун-т, 2014. – 92 с.

Поступила 10.01.2017 г.

Информация об авторах

Долгаль А.С., доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории геопотенциальных полей Учреждения Российской академии наук «Горный институт Уральского отделения РАН».

Христенко Л.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории наземной и под-земной электротометрии Учреждения Российской академии наук «Горный институт Уральского отделения РАН».

UDC 550.83.016

APPLICATION OF EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION METHOD IN PROCESSING GEOPHYSICAL DATA

Alexander S. Dolgal¹,
dolgal@mi-perm.ru

Liudmila A. Khristenko¹,
liudmila.hristenko@yandex.ru

¹ Mining Institute of the Ural Branch Russian Academy of Sciences,
78-a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

The relevance of the research is caused by the feasibility of using advanced mathematical methods in processing results of the geophysical surveys.

The aim of the research is to improve the effectiveness of the methods of applied Geophysics through adaptive extraction of informative components of the physical fields using the Empirical Mode Decomposition method (EMD).

The method of research: decomposition of the relevant geophysical data. The iterative computational process allows allocating different frequency orthogonal signal components, which are called empirical mode functions (IMFs). The method is designed to represent non-stationary signals in the form of a series of signals with different frequency. The authors propose the original algorithm in which the sourcewise approximation is used for constructing functions, enveloping the extrema of the analyzed signal, and the residual component of decomposition can identify the background component of the field.

The results. The EMD algorithm was implemented and tested on practical materials for processing the data of gravity, magnetic and electrical prospecting. The authors defined the possibility of applying the method to separate the informative component of the results of electric methods of horizontal profiling (Perm Krai); to evaluate the quality of high-precision gravity survey (Western Sayan); to determine the component of the magnetic field caused by the impact of sharply dissected terrain of the earth surface in the development of the effusive traps (Norilsk region). The last case uses a series of regression dependencies between the various frequency components of the magnetic field and heights. The authors made the conclusion on appropriateness of using the EMD technique in applied Geophysics. The prospects of its application the authors see in analysis of geophysical monitoring material of mineral deposits development.

Key words:

Signal, Empirical Mode Decomposition, algorithm, approximation, field component, gravity survey, magnetic survey, electrical prospecting.

The research was supported by the grants of RFBR no. 16–45–590046, no. 15–05–01823.

REFERENCES

- Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1998, vol. 454, pp. 903–995.
- Huang N.E., Samuel S.S.P. *Hilbert–Huang Transform and its applications*. Singapore, World Scientific Publishing Co, 2005. 323 p.
- Yastrebov I.P. On properties and applications of Hilbert–Huang transform. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2016, no. 1, pp. 26–33. In Rus.
- Nezhevenko E.S., Feoktistov A.S. Preobrazovanie Gilberta–Huang dvumernykh izobrazheniy i ispolzovanie ego dlya vydeleniya teksturnykh priznakov [The Hilbert–Huang transform of two-dimensional images and its use to highlight texture features]. *Regionalnye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Materials of the international scientific conference. Regional problems of Earth remote sensing]. Krasnoyarsk, Russia, 23–26 September 2014. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Press, 2014. pp. 200–203.
- Safiullin N.T. *Razrabotka metodiki analiza vremennykh ryadov s pomoshchyu preobrazovaniya Huang–Gilberta*. Dis. kand. nauk [Development of methods of time series analysis by the Huang–Hilbert converting. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2015. 193 p.
- Kahaner D., Moler C., Nash S. *Numerical Methods and Software Cleve Moler and Stephen Nash*. Englewood Clis, Prentice-Hall, 1989. 495 p.
- Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitailo V.A. Wavelets and their uses. *Physics, Uspekhi*, 2001, vol. 44, no 5, pp. 447–478.
- Huang N.E., Wu Z. A review on Hilbert–Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Rev. Geophys.*, 2008, 46, RG2006. DOI: 10.1029/2007RG000228.
- Pavlov A.N., Filatova A.E. Empirical mod and wavelet filtering: application to Geophysics problems. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 3–13. In Rus.
- Dolgikh L.A. Vydelenie informativnoy sostavlyayushchey seismoakusticheskogo signala: vozmozhnye podkhody [Allocation of the informative component of the acoustic signal: possible approaches]. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: Trudy mezhdunarodnoy nauchnoy tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the international scientific technical conference. Problems of automation and control in technical systems]. Penza, IIC PGU, 2008, pp. 322–323.
- Ivanov D.B., Baburkina M.A. Analiz izmeneniya chastotnogo sostava signalov estestvennoy i vyzvannoy seismoakusticheskoy emissii [Analysis of changes of frequency composition of signals of natural and induced seismoacoustic emissions]. *Dvenadtsataya uralskaya molodezhnaya nauchnaya shkola po geofizike: Sbornik nauchnykh Materialov* [Twelfth Ural youth scientific school on Geophysics: Proc.]. Perm, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011. pp. 86–90.
- Davydov V.A., Davydov A.V. Management of Empirical Mode Decomposition of signals in the analysis and processing of geophysical data. *Karotazhnik*, 2010, no. 5, pp. 98–114. In Rus.

13. Hassan H.H., Peirce J.W. Empirical Mode Decomposition (EMD) of potential field data: airborne gravity data as an example. *Recorder*, January 2008, vol. 33, no. 01, pp. 25–30. Available at: <http://csegrecorder.com/articles/view/empirical-mode-decomposition-emd-of-potential-field-data/> (accessed 27 October 2016).
14. Nikitin A.A., Petrov A.V. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii* [Theoretical bases of processing geophysical data]. Moscow, RGGU Press, 2008. 112 p.
15. Blokh Yu.I. Problema adekvatnosti interpretatsionnykh modeley v gravirazvedke i magnitorazvedke [The problem of adequacy of the interpretive models in gravity and magnetic]. *Geofizicheskiy vestnik*, 2004, no. 6, pp. 10–15.
16. Ulyanova Yu.E., Babenko R.G., Chernov A.V. The time frequency conversion used in digital signal processing. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*, 2015, no. 3 (16), pp. 36–42. In Rus.
17. Davydov V.A., Davydov A.V. Cleaning geophysical data from noise using the Hilbert–Huang transform. *Elektronnoe nauchnoe izdanie «Aktualnye innovatsionnye issledovaniya: nauka i praktika»*, 2010, no. 1. Available at: <http://www.actualresearch.ru> (accessed 17.10.2016). In Rus.
18. Chen Q., Huang N., Riemenschneider S. A B-spline approach for empirical mode decomposition. *Adv. Comp. Math.*, 2004, no. 24, pp. 171–195.
19. *Gravirazvedka: spravochnik geofizika* [Gravity: geophysics guide]. Eds. E.A. Mudretsova, K.E. Veselov. Moscow, Nedra Publ., 1990. 607 p.
20. Strakhov V.N., Stepanova I.E. The S-Approximation Method and its Application to Gravity Problems. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2002, vol. 38, no. 2, pp. 91–107.
21. Balk P.I., Dolgal A.S., Pugin A.V., Michurin A.V., Simanov A.A., Sharkhimullin A.F. Effective Algorithms for Sourcewise Approximation of Geopotential Fields. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 896–911.
22. Balk P.I., Dolgal A.S. Three-dimensional assembly technologies for the interpretation of gravimetric data. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 427, no. 2, pp. 971–974.
23. Dolgal A.S., Chekhovich K.M. Complex interpretation of geopotential fields on searches or copper-nickel-platinum metallization (Norilsk region). *Geologiya i geofizika*, 1998, vol. 39, no. 11, pp. 1615–1625.
24. Dolgal A.S. *Magnitorazvedka: kompyuternye tekhnologii ucheta vliyaniya relefa mestnosti* [Magnetic: computer technology of considering the influence of the terrain]. Perm, Perm State National Research University Press, 2014. 92 p.

Received: 10 January 2017.

Information about the authors

Alexander S. Dolgal, Dr. Sc., chief research worker, Mining Institute of the Ural Branch Russian Academy of Sciences.

Liudmila A. Khristenko, Cand. Sc., researcher, Mining Institute of the Ural Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 552.143

ЛИТОЛОГО-ФАЦИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ Т

Бегма Дмитрий Сергеевич¹,
dsbegma@mail.ru

Белкина Валентина Александровна¹,
belkina@tsogu.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность работы предопределена тем, что практически все геологические задачи решаются на основе моделей, точность которых заметно повышается при использовании седиментологической составляющей. Седиментологические факторы контролируют условия формирования, размещение и качество резервуара и покрышек. Это означает, что учет седиментологических моделей повышает эффективность геологоразведочных работ на нефть и газ, в частности подготовку залежей к разработке и их эксплуатационному разбуhrиванию.

Цель работы: обоснование седиментологической модели формирования отложений пород пласта Ю₃^а (песчаники верхнеюрских отложений) газоконденсатного месторождения Т (Ямало-Ненецкий АО) по керну двух скважин.

Методы исследования: методы литологического анализа состава горных пород, разделения горных пород по литологическим характеристикам на литотипы, фациального анализа, комплексного анализа литолого-петрофизических данных.

Результаты. На основе анализа ядерного материала выделено 6 литотипов и 6 обстановок осадконакопления (фаций) отложений продуктивного пласта Ю₃^а месторождения Т. Литотипы значительно различаются по фильтрационно-ёмкостным свойствам. Выделенные литотипы объединены в более крупные седиментационные комплексы – фациальные ассоциации, отвечающие более крупным по масштабу осадочным системам. Комплекс выделенных ассоциаций в пределах изучаемого пласта месторождения Т позволил обосновать седиментологическую модель формирования отложений. Отложения пласта Ю₃^а накапливались в обстановке барьерно-островного комплекса в условиях сноса материала с запада на восток. Показано, что наилучшими фильтрационно-ёмкостными свойствами обладают литотипы 3 и 4, а наихудшими – литотип 1. Отложения литотипа 3 формировались в условиях отливной дельты морского устья приливно-отливной протоки, а литотипа 4 – в мелководно-морской обстановке трансгрессивного пляжа, в условиях умеренной активности волновых процессов.

Ключевые слова:

Литотип, фация, седиментологические модели, прибрежно-морские фации, барьерно-островной комплекс, верхнеюрские отложения.

Введение

Основные разведанные запасы нефти и газа Западной Сибири приурочены к меловым и верхнеюрским отложениям, которые всё ещё остаются не до конца изученными. Большое число месторождений данной провинции находится на стадии поздней разработки, прирост запасов существенно отстаёт от добычи. В этих условиях активно ведётся поиск и разведка. Для повышения эффективности разработки месторождений и создания стратегии поиска и разведки необходима качественная геологическая основа (модель), которая может быть получена только на основе комплексирования всего объема геолого-технической информации с различным диапазоном точности и адекватного научно-технического подхода.

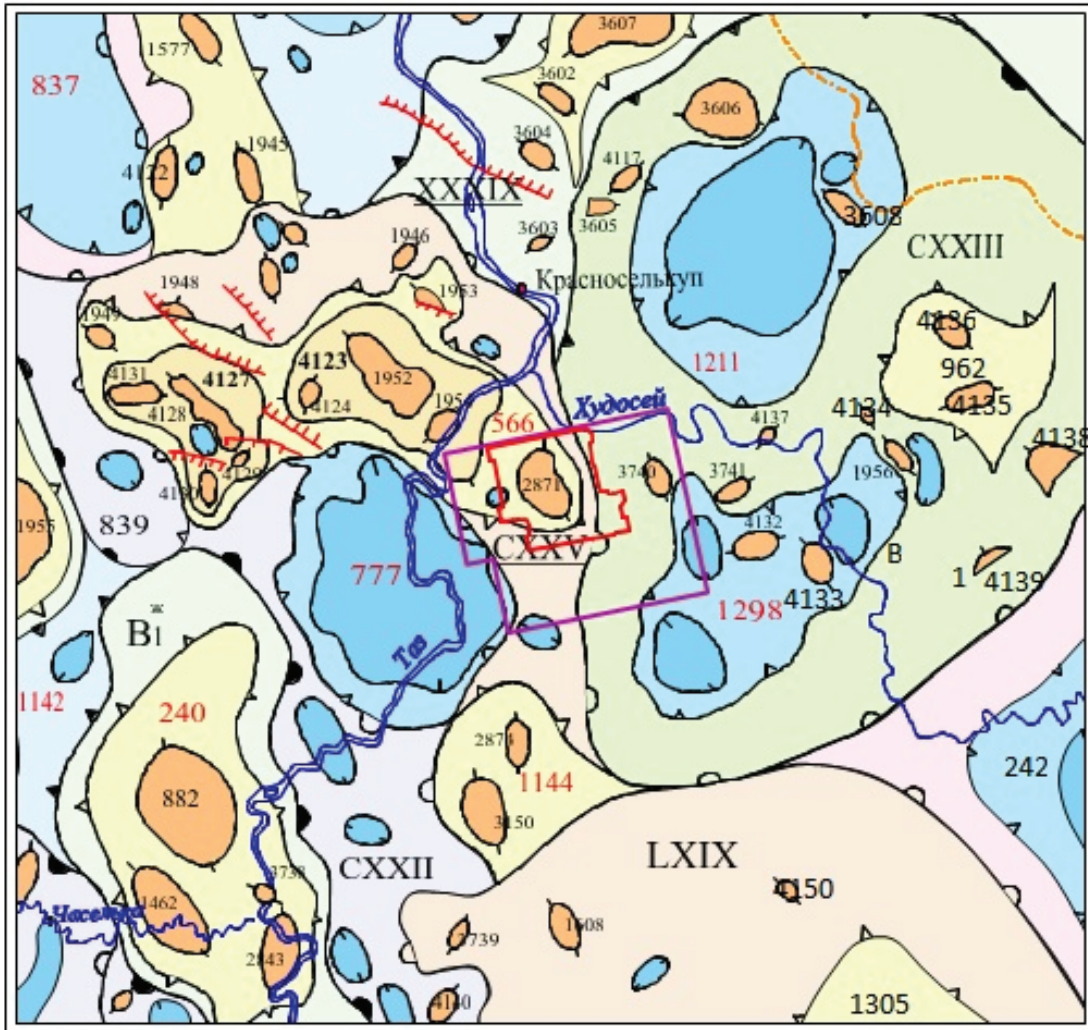
Детализация геологического строения продуктивных пластов приобретает особую значимость на этапе проектирования разработки месторождений, что повышает эффективность их разработки: геологические объекты целесообразно рассматривать не как единое целое, а выделять в них составные части для выбора приоритетных объектов и стратегии разработки. Данный подход позволяет, например, определить оптимальное количество скважин (в том числе их размещение) для наиболее эффек-

тивной выработки запасов, уменьшить неопределенности, связанные с геологическим строением, а также прогнозировать зоны с наиболее высокими фильтрационно-ёмкостными свойствами (ФЕС). Детальные трёхмерные геологические модели на основании комплекса геолого-геофизической информации являются надёжным инструментом для решения этих задач.

Базисом построения корректной цифровой трёхмерной геологической модели является концептуальная модель (КМ). КМ даёт формализованные представления о геологическом строении объекта (стратиграфия, тектоника, генезис отложений, морфология и закономерности изменения ФЕС), положенные в основу геологической модели [1, 2].

Построение концептуальной модели предваряет литолого-фациальный анализ, который требует проведения:

- детального анализа структурных и текстурных особенностей;
- анализа гранулометрического состава осадков: размера зёрен, их формы и окатанности, структуры поверхности. Эти параметры отражают динамику и способ переноса осадков и, в значительной степени, условия отложений.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
 Контуры структур











-  B1 - Субрегиональных (внешнего пояса мегасинеклизы, мегатеррасы)
-  B1* - I порядка - крупных (поясов мегавалов, поясов мегапрогибов и т.д.)
-  LXIX - I порядка - средних и малых (впадин, мегавалов, мегапрогибов, моноклиналей и т.д.)
-  XXXIX - II порядка - крупных (валов, прогибов, малых моноклиналей, мелоседловин и т.д.)
-  S66 - II порядка средних и малых (малых валов, малых прогибов, куполовидных поднятий и др.)
-  4123 - III порядка - крупных куполов, крупных брахиантиклиналей и т.п.
-  1462 - III порядка средних и мелких и IV порядка (локальных структурных носов и др.)
-  - границы Термокарстового л.у.
-  - рамка работ 3D
-  - Дизъюнктивные нарушения

Рис. 1. Фрагмент тектонической карты мезозойско-кайнозойского ортоплатформенного чехла Западно-Сибирской геосинеклизы (В.С. Бочкарев, 1990)

Fig. 1. Fragment of Mesozoic-Cenozoic tectonic map of the West Siberian Orthoplatfrom cover geosyneclise (V.S. Bochkaev, 1990)

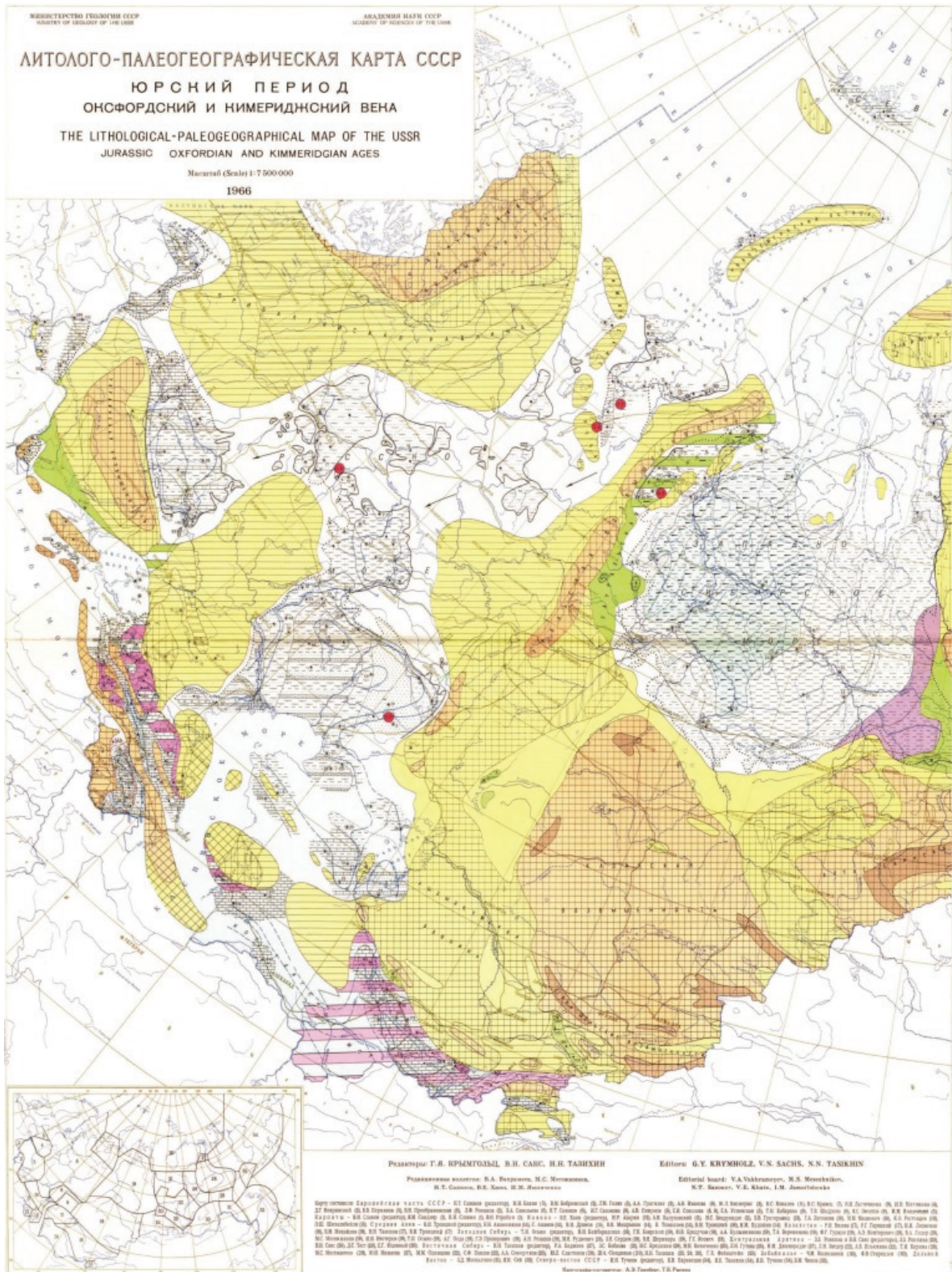


Рис. 2. Фрагмент литолого-палеогеографической карты юрского периода оксфордского и кимериджского века (Г.Я. Крымгольц, В.Н. Сакс, Н.Н. Тазихин, 1968 [3])

Fig. 2. Fragment of the Jurassic Oxford and Kimmeridgian sequence lithologic-paleogeographic maps (G.Ya. Krymholz, V.N. Saks, N.N. Tazikhin, 1968 [3])

Объект исследования – песчаники верхнеюрских отложений Т лицензионного участка. Т газоконденсатное месторождение расположено в Ямало-Ненецком АО в пределах крупной антиклинальной структуры. Оно приурочено к одноимённому локальному поднятию Пур-Тазовской НГО Западно-Сибирской НПП, является многопластовым: продуктивными и потенциально продуктивными здесь являются горизонты, начиная с тюменской свиты и стратиграфически выше вплоть до отложений нижнемелового возраста. В тектоническом отношении Т лицензионный участок расположен в Надым-Тазовской синеклизе (структура I порядка) в зоне сочленения структур II порядка: Нижнехудоусейской малой впадины и Западно-Красноселькупского крупного вала (рис. 1). Термокарстовое поднятие осложняет Тычельско-Западно-Красноселькупский малый вал. В пределах участка выделяется также Восточно-Термокарстовое поднятие, осложняющее Нижнехудоусейскую малую впадину.

Седиментологическое изучение верхнеюрских отложений проведено по керну двух скважин 211 (вынос керна 97,3 %) и 207 (вынос керна 100 %) Т месторождения. Обе скважины пробурены в куполе залежи. В скважине 207, с высоким процентом выноса керна, вскрыты алевроито-песчаные отложения пласта Ю₁^{а(1)}. Суммарная толщина разреза, изученного по керну скважины 207, составляет 61,09 м (99,57 %). В скважине 211 с отбором керна вскрыты алевроито-песчаные отложения стратиграфического разреза в объеме продуктивных пачек Ю₁^а, Ю₁^{а(1)}, Ю₁¹, Ю₁², Ю₂⁰. Суммарная толщина разреза, изученного по керну из скважины 211, составляет 116,8 м (97,4 %).

Согласно региональным исследованиям А.Э. Конторовича, М.Я. Рудкевича, И.И. Нестерова и др. формирование верхнеюрских отложений происходило в прибрежно-морской обстановке в условиях сноса материала с запада на восток (рис. 2).

На основе полученных данных, керновый материал систематизирован по фациальным признакам с выделением 6 литотипов и 6 обстановок осадконакопления (фаций). Седиментологическое описание керна по скважинам 207 и 211 выполнено А. Лопатиным, К. Зверевым и др. (2014 г.). В настоящей работе изложены результаты седиментологического анализа пород пачки Ю₁^а. На Т площади кровля пласта Ю₁^а совпадает с кровлей сивговской свиты. В целом породы-коллекторы представлены песчаниками зеленовато-серыми и алевролитами, содержащими прослойки глауконитовых глин и остатки морской фауны: следы аммонитов, ядра двустворок, ростры белемнитов. Отмечается пирит, пиритизированные водоросли и редкий растительный детрит. Пласт имеет эффективные толщины до 15–20 м. К кровле свиты (пласт Ю₁^а) приурочен отражающий горизонт Б₂₀.

Характеристика литотипов

Литотип 1 сложен однородными интенсивно биотурбированными темно-серыми алевролитами, местами с линзами тонкозернистого песчаника с низкоамплитудной волновой рябью (рис. 3, а). Далее А.О. означает абсолютная отметка. Встречаются единичные ростры белемнитов, створки раковин, целые раковины двустворчатых моллюсков в прижизненном захоронении. Биотурбационные текстуры характеризуются умеренным разнообразием с преобладанием наклонно и горизонтально ориентированных ходов морских червей и мелких ракообразных (*Asterosoma*, *Chondrites*, *Rosselia*, *Terebellina*, *Phycosiphon*) [4–11].

Преобладающая гранулометрическая фракция для этого литотипа алевроитовая мелкозернистая (рис. 4, а). Сортировка обломочного материала плохая ($S_0=2,16$). Значения открытой пористости варьируют от 7,9 до 12,9 %, в среднем 10,9 % ($n=18$). Проницаемость не превышает 0,4 мД.

Глинисто-алевритовый состав пород литотипа 1, высокая степень их биотурбационной переработки, присутствие остатков морской макрофауны, а также песчаных линз с низкоамплитудной волновой рябью свидетельствуют о накоплении в нормальных морских условиях на уровне среднего базиса штормовых волн в обстановке проксимальной части дальней зоны подводного берегового склона регрессивных и трансгрессивных береговых линий, характеризующейся относительно низкой динамикой волновых процессов. Невысокие скорости седиментации способствовали заселению субстрата бентосными организмами и его биотурбации с полным разрушением первичных осадочных текстур.

Литотип 2 сложен мелко- и крупно-косослоистыми мелкозернистыми песчаниками. Косослоистое строение песчаников подчеркивается присутствием в них относительно немногочисленных глинистых слойков, большинство из которых имеет сдвоенное строение (рис. 3, б). Толщина крупно-косослоистых серий 0,1–0,4 м. Максимальный угол падения передовых слойков 18–22°. Ходы бентосных организмов отсутствуют или представлены редкими следами бегства (*Fugichnia*) и единичными ходами червей.

По результатам гранулометрического анализа породы представлены песчаниками тонко-мелкозернистыми, алевроитистыми ($n=37$) (рис. 4, а). Сортировка обломочного материала от хорошей до плохой (что, по-видимому, объясняется попаданием глинистых прослоев в пробу). Среди вторичных преобразований наиболее широко развита регенерация кварца и эпигенетическое расширение открытых пор, обусловленное частичным растворением неустойчивых обломочных компонентов. Значения открытой пористости изменяются в пределах 5,1–19,7 %, составляя в среднем 13 %. Проницаемость изменяется в широких пределах: от

0,04 до 161,2 мД. Наибольшей проницаемостью обладают отложения, сформировавшиеся в обстановке подводного речного русла с влиянием приливов и приливо-отливной протоки. Невысокие

значения проницаемости зафиксированы в основном в породах с карбонатным цементом. Низкая сообщаемость открытых пор обусловлена высоким содержанием обломков как алевритовой, так и



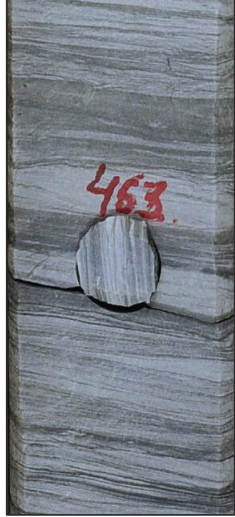



		
<p><i>a/a</i></p> <p>Литотип 1. Интенсивно биотурбированный глинистый алевролит. Строение породы полностью нарушено ходами морских червей (Chondrites, Helminthopsis, Paleophycus), вверху образца – роостр белемнита. А.О. отбора керна – 2530,4 м</p> <p>Lithotype 1. Intensively bioturbated argillaceous siltstone. The rock structure is completely broken by moves of marine worms (Chondrites, Helminthopsis, Paleophycus), belemnite is at the top of the sample</p> <p>True vertical depth of core is 2530,4 m</p>	<p><i>б/б</i></p> <p>Литотип 2. Крупно косослоистый мелкозернистый песчаник с немногочисленными сдвоенными глинистыми слоями. А.О. отбора керна – 2535,2 м</p> <p>Lithotype 2. Cross-bedded fine-grained sandstone with a few twin clay lamination.</p> <p>True vertical depth of core is 2535,2 m</p>	<p><i>в/с</i></p> <p>Литотип 3. Тонкозернистый мелко-косослойчатый песчаник с многочисленными слоями и прослоями глинистого алевролита. В верхней части образца в песчанике присутствуют углефицированные остатки корневой системы растений.</p> <p>А.О. отбора керна – 2539,8 м</p> <p>Lithotype 3. Fine-grained cross-stratified sandstone with a numerous clay siltstone lamination. There are coalified relicts of the plant root system in the upper part of sandstone. True vertical depth of core is 2539,8 m</p>
		
<p><i>г/д</i></p> <p>Литотип 4. Интенсивно биотурбированный тонко-мелкозернистый глауконитовый песчаник, обогащенный рострами белемнитов. А.О. отбора керна – 2542,5 м</p> <p>Lithotype 4. Intensive bioturbated fine-grained glauconite sandstone. There are a lot of enriched belemnites in sandstone. True vertical depth of core is 2542,5 m</p>	<p><i>д/е</i></p> <p>Литотип 5. Биотурбированный песчаник с глинистыми слоями и тонкими прослоями. А.О. отбора керна – 2546,4 м</p> <p>Lithotype 5. Bioturbated sandstone with Puffs and thin layers of clay. True vertical depth of core is 2546,4 m</p>	<p><i>е/ф</i></p> <p>Литотип 6. Однородный интенсивно биотурбированный тонко-мелкозернистый песчаник А.О. отбора керна – 2549,1 м</p> <p>Lithotype 6. Intensive bioturbated homogeneous fine-grained sandstone. True vertical depth of core is 2549,1 m</p>

Рис. 3. Фотографии образцов керна, отобранных из скважины 211 Т месторождения

Fig. 3. Core samples photographs from 211 well of the field Т

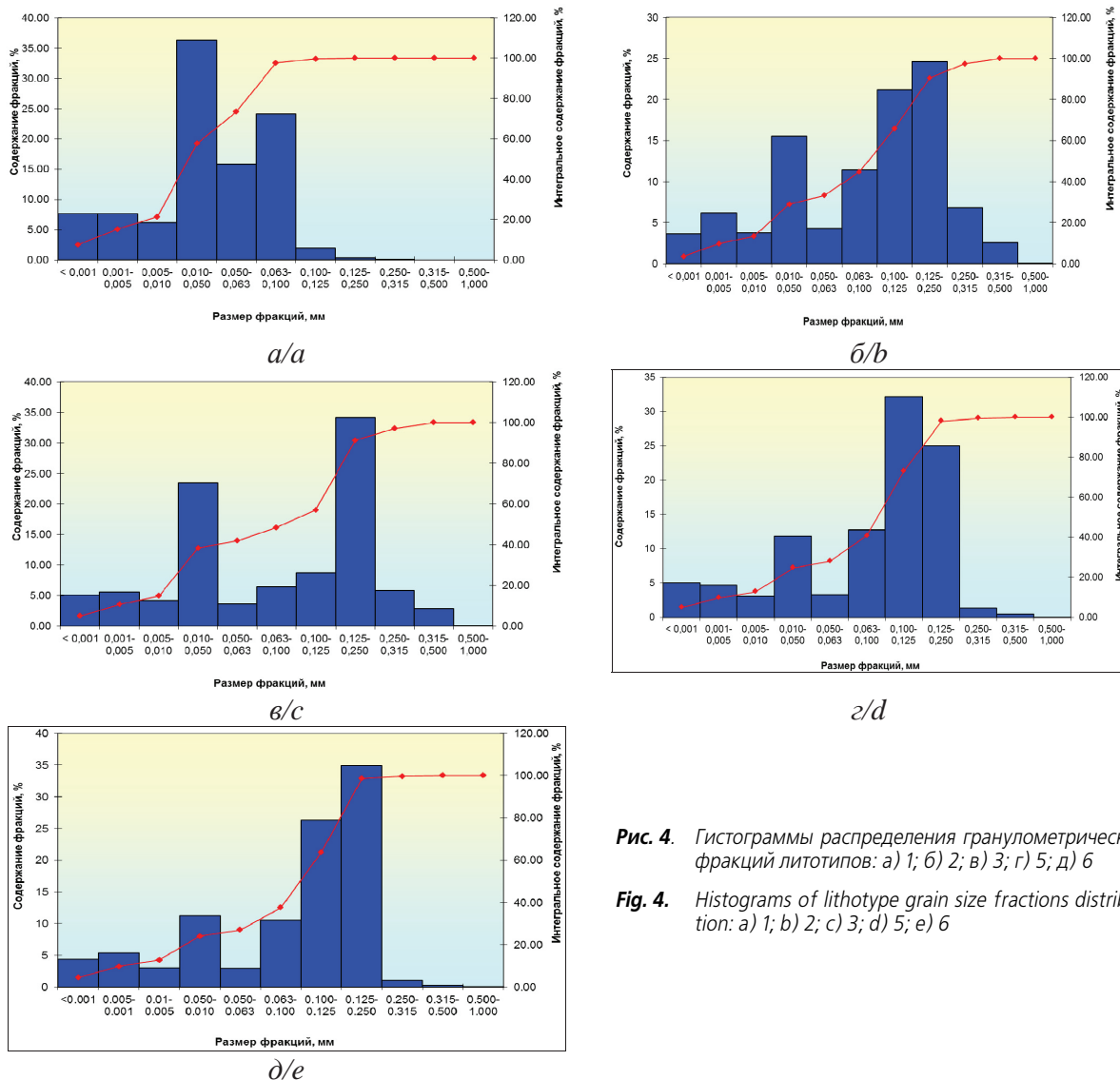


Рис. 4. Гистограммы распределения гранулометрических фракций литотипов: а) 1; б) 2; в) 3; г) 5; д) 6

Fig. 4. Histograms of lithotype grain size fractions distribution: a) 1; b) 2; c) 3; d) 5; e) 6

среднепесчаной фракций, плотной упаковкой обломочного скелета, наличием микролинз мелкоалевритово-глинистого материала, карбонатизацией, окварцеванием. Сдвоенные глинистые слои могут существенно снижать проницаемость перпендикулярно напластованию.

Косослойное строение песчаников, присутствие в них сдвоенных глинистых слоев свидетельствуют об их накоплении в морских или прибрежных обстановках в условиях приливно-отливного режима с высокой скоростью приливно-отливного течения, способствующей образованию и миграции подводных дюн. Сдвоенное строение глинистых слоев указывает на формирование косослойчатых песчаников ниже уровня отлива [12]. Слабая биотурбационная переработка песчаников могла быть результатом стрессовых условий среды для обитания бентосных организмов, связанных с резкими колебаниями солености (периодические распреснения) и/или постоянно высокой активностью гидродинамики среды (подвижный субстрат).

Литотип 3 сложен светло-серыми тонко- и мелкозернистыми мелко-косослойчатыми песчаниками с флазерной и волнистой слоистостью, обусловленной присутствием в песчанике многочисленных слоев и тонких прослоев темно-серых аргиллитов и глинистых алевролитов (рис. 3, в). В песчаниках развита мелкая косая асимметричная слоистость ряби течений.

На гистограмме распределения гранулометрических фракций отмечаются два максимума, которые отражают в строении породы частое чередование мелкозернистого песчаника и мелкозернистого алевролита (рис. 4, в).

По содержанию породообразующих компонентов породы относятся к граувакковым аркозам (кварц – 38 %, полевые шпаты – 48 %, обломки пород – 14 %). Из аксессуаров присутствуют эпидот, циркон, гранат, сфен. Цемент глинистый до карбонатно-глинистого. Из глинистых минералов в отложениях пласта Ю₁^а доминирует каолинит (около 90 %).

Из постседиментационных преобразований пород, оказывающих сильное влияние на ФЕС пород, следует отметить регенерацию кварца и коррозионное расширение пор, за счет растворения неустойчивых обломочных компонентов. Значения открытой пористости варьируют от 1 до 27 %, в среднем 16 %. Проницаемость варьирует в пределах от 0,1–115,0 мД, в среднем 32 мД. Низкие значения пористости и проницаемости в отдельных образцах обусловлены развитием карбонатного цемента. Однако при этом отмечаются коррозионно-расширенные микропоры, обусловленные частичным растворением зерен полевых шпатов (рис. 5). Также отрицательное влияние на ФЕС оказывает наличие многочисленных прослоев мелкозернистого алевролита. Структура порового пространства коллектора по А.А. Ханину соответствует IV классу. Сообщающиеся открытые поры в постседиментационном этапе подверглись частичному эпигенетическому расширению, о чём свидетельствуют фрагменты частично растворившихся обломочных зерен. Межзерновое пространство заполнено пленочным хлоритом и полевошпатово-кварцевым цементом. Регенерация кварца представлена в виде неравномерных наростов, кварцитоподобных структур, а поры выполнены каолинитом, хлоритом и кальцитом. Вторичная микропористость обусловлена выщелачиванием полевых шпатов.

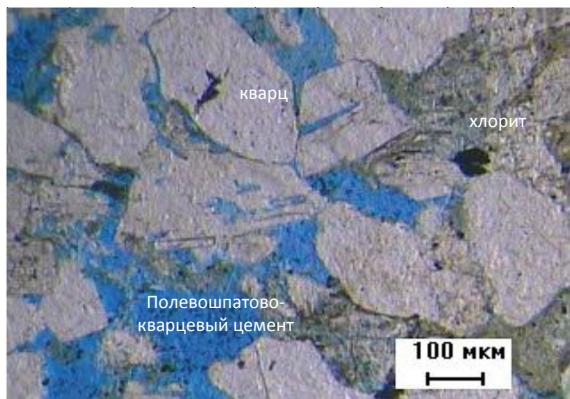


Рис. 5. Литотип 3. Увеличение 100х. Николи II

Fig. 5. Litotype 3. Increase 100x. Nicholas II

Образование мелко косослойчатых песчаников с фазерной и волнистой слоистостью происходило в условиях приливо-отливного режима, характеризовавшегося неустойчивой активностью гидродинамики среды и невысокой скоростью приливо-отливного течения, способствовавших периодическому отложению глинистых слойков и прослоев. Такие условия седиментации могут быть характерны для обстановок песчаных и песчано-илистых приливо-отливных отмелей и баров, а также дельты с приливо-отливным влиянием.

Литотип 4 состоит из интенсивно биотурбированных глауконитовых зеленовато-серых тонко-мелкозернистых песчаников с переложенным раковинным детритом и рострами белемнитов. В песчанике встречаются овальные стяжения си-

дерита (рис. 3, з). На строение песчаника определенное влияние оказала интенсивная постседиментационная переработка осадка бентосными организмами с полным разрушением первичных осадочных текстур. Порода имеет в той или иной степени выраженный крапчатый облик вследствие присутствия глинистого материала, сосредоточенного на стенках и внутри ходов бентоса. Биотурбационные текстуры в песчанике представлены разнообразными ходами морских червей и мелких ракообразных (*Astherosoma*, *Diplicraterion*, *Helminthopsis*, *Ophyomorpha*, *Palaeophycus*, *Phycosiphon*, *Rosselia*, *Thalassinoides*).

Открытая пористость варьирует от 8 до 16 %. Проницаемость изменяется от 0,1 до 0,2 мД, и лишь в одном образце – 58 мД.

Образование биотурбированных глауконитовых песчаников литотипа 4 происходило в условиях морского мелководья при трансгрессии, с дефицитом поступления терригенных осадков и постоянного волнового/штормового воздействия на дно. Отсутствие или слабое поступление новых порций терригенных осадков приводило к низким темпам седиментации, что при умеренной волновой активности способствовало как усилению роли аутигенного минералообразования и обогащению песчаного осадка глауконитом и раковинным детритом (за счет вымывания глинистой фракции), так и заселению субстрата бентосными организмами с полным разрушением первичных текстурных особенностей осадков.

Литотип 5 сложен биотурбированным светло-серым алевроглинистым тонко-мелкозернистым песчаником. Он участками имеет полосчатое строение за счет присутствия тонких (1–3 см) прослоев серого опесчаненного (за счет биотурбации) алевролита (рис. 3, д).

В песчанике местами отмечаются реликты мелкой косо-слоистости волновой ряби. Строение литотипа 5 сильно нарушено биотурбационной переработкой первичного осадка. Концентрация глинистого вещества по ходам бентоса приводит к сильной глинизации. Биотурбационные текстуры в породе представлены горизонтально и наклонно ориентированными ходами морских червей, мелких ракообразных ихнофагии *Cruziana* (*Asterosoma*, *Cylindrihnus*, *Helminthopsis*, *Teichichnus*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rosselia*, *Thalassinoides*).

По результатам гранулометрического анализа породы сложены преимущественно песчаниками мелко-тонкозернистыми (рис. 3, д). Отсортированность обломочного материала от хорошей до средней. Преобладающий тип цемента пленочно-поровый, участками до базально-порового. По составу преимущественно глинистый, реже карбонатный. Существенное влияние на снижение ФЕС пород оказывает скопление глинистого материала в стенках ходов бентосных организмов. Наилучшие ФЕС для данного литотипа приурочены к обстановке нижней предфронтальной зоны пляжа с влиянием приливных процессов (*Tidal-unfluenced Lower Shore face*).

Интенсивная биотурбационная переработка песчаников, присутствие глинистых слоев и прослоев, а также следов волновой ряби свидетельствует о накоплении в мелководно-морских обстановках переходной зоны подводного берегового склона и нижней части предфронтальной зоны пляжа, расположенных выше среднего базиса штормовых волн. Условия седиментации в зоне подводного берегового склона характеризовались неустойчивым гидродинамическим режимом – чередованием периодов спокойного гравитационного осаждения тонкозернистых фракций осадков из столба воды с периодами повышенной активности гидродинамики среды, связанными с проявлением штормовых процессов. Присутствие в песчанике текстур волновой ряби указывает на их образование волновыми/штормовыми процессами [5, 6]. Интенсивное развитие биотурбационных текстур в песчаниках связано с невысокой частотой периодов высокой активности гидродинамики среды или их небольшой продолжительностью и интенсивностью, что благоприятствовало заселению субстрата бентосными организмами и практически полному разрушению первичных текстурных особенностей строения осадков.

Литотип 6 сложен интенсивно биотурбированным однородным тонко-мелкозернистым песчаником (рис. 3, е). Биотурбация относительно равномерно распределена в массе породы. Концентрация глинистого вещества на стенках и внутри (заполнение) ходов бентосных организмов обусловила глинизацию песчаника.

Биотурбационные текстуры представлены в песчаниках комплексом горизонтально и наклонно ориентированных ходов морских червей и мелких ракообразных ихнофаций *Cruziana* (проксимальная часть) и *Scolites* (*Asterosoma*, *Chondrites*, *Cylindrichnus*, *Helminthopsis*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Phicosiphon*, *Terebellina*).

По результатам гранулометрического анализа отложения представлены преимущественно песчаниками тонко-мелкозернистыми с примесью мелкозернистой алевритовой фракции (рис. 4, е). Отсортированность обломочного материала преимущественно средняя.

Среди вторичных преобразований наибольшее влияние на ФЕС оказывает регенерация кварца, карбонатизация, локальное расширение открытых пор за счет растворения неустойчивых обломочных компонентов (рис. 6). Вторичная микропористость обусловлена выщелачиванием полевых шпатов, а структура порового пространства коллектора по А.А. Ханину соответствует IV классу.

Фильтрационно-емкостные свойства пород данного литотипа контролируются преимущественно гранулометрическим составом пород. Для тонкозернистых песчаников значения открытой пористости варьируют в пределах 7–25 %, в среднем 17 %. Проницаемость колеблется в пределах от 0,06 до 36 мД, в среднем составляет 3 мД. Для мелкозернистых песчаников: пористость 8–18 %,

в среднем 16 %, проницаемость от 2 до 68 мД, в среднем 23 мД. Основные литологические факторы, снижающие ФЕС пород, – плотная упаковка обломочных зерен в тонкозернистых песчаниках, наличие микролинзочек мелкоалевритово-глинистого материала (глинизация стенок ходов бентосных организмов) [13].

Образование интенсивно биотурбированных песчаников связывается с мелководно-морскими условиями седиментации, характеризовавшимися постоянно умеренной активностью волновых/штормовых процессов, способствовавшими накоплению осадков преимущественно песчаной размерности [5, 6]. Невысокая интенсивность проявления волновых процессов способствовала заселению субстрата морскими формами бентосных организмов, в результате чего происходила сильная биотурбационная переработка осадка с полным разрушением его первичных текстурных особенностей. В морских обстановках условия, благоприятные для накопления интенсивно биотурбированных песчаных осадков, могут создаваться в пределах переходной зоны подводного берегового склона и дистальной части нижней предфронтальной зоны пляжа [14–16].

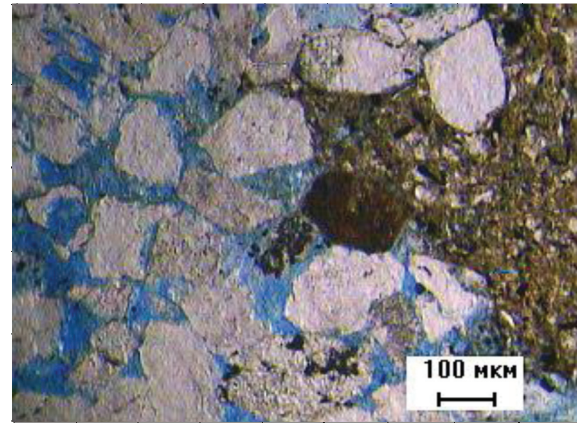


Рис. 6. Литотип 6. Увеличение 100х. Николи II

Fig. 6. Litotype 3. Increase 100x. Nicholas II

Выделенные обстановки осадконакопления, их диагностические признаки и ФЕС сведены в таблице.

Из анализа данных таблицы следует, что наилучшими ФЕС обладают литотипы 3 и 4, а наихудшими – литотип 1.

Характеристика обстановок осадконакопления

Известно, что большинство литотипов накапливаются в разных фациальных обстановках [4, 12, 17]. Для выделенных литотипов пласта Ю₁^а месторождения Т литотипы и соответствующие им фации сведены в блок-схему (рис. 7). На основе седиментологического изучения пласта выделено 6 литотипов, которые могут быть сведены в более крупные комплексы – фациальные ассоциации, отвечающие более крупной по масштабу осадочной системе барьерно-островного комплекса отложений (рис. 7, 8).

Таблица. Сводная таблица обстановок осадконакопления

Table. General table of depositional environment

Литотип Lithotype	Обстановка осадконакопления Depositional environment	Основные диагностические признаки по керну Main core diagnostic features	Органические остатки, биотурбация Fossils, bioturbation	$K_{лн}$, % интервал среднее $K_{р}$, % range mean	$K_{лр}$, мД интервал среднее $K_{рerm}$, мД range mean
1	Upper Offshore (UOF) Проксимальная часть дальней зоны подводного берегового склона	Алевролиты тёмно-серые интен- сивно биотурбированные Intensively bioturbated Dark gray siltstones	Ростры белемнитов, створки раковин. Ихновицы: Asterosoma, Chondrites, Rosselia, Terebellina, Phycosiphon Roas- ters of belemnites, scallop-shell, ichno- fossils: Asterosoma, Chondrites, Rosselia, Terebellina, Phycosiphon Roasters of be- lemnites	7,9–12,9 10,9	0,05–0,3 0,2
2	Ebb tidal delta (ETD), Tidal inlet (TI) Отливная дельта морского устья приливно-отливной протоки. Приливно-от- ливная протока барьерно- островной системы	Песчаники серые мелко- и крупно косослоистые, мелко и среднезер- нистые с немногочисленными сдвоенными глинистыми слоями Thin and coarse cross-bedded, fine and medium gray sandstones with a few double clay lamination	Следы бегства (Fugichnia) и единичные ходы червей (Planolites) Ichnofossils: Fugichnia, Planolites	5,1–19,7 12,7	0,04–161, 2 12,2
3	Ebb tidal Delta (ETD) Отливная дельта морского устья приливно-отливной протоки	Песчаники светло-серые тонкозернистые мелко косослойчатые с рябью течения Fine-grained crossbedded light gray sandstones, with ripples flow		1,1–26,9 15,5	0,1–115,5 32,6
4	Transgressive condensed la- yer (TL) Трансгрессивный конден- сированный слой	Песчаники глауконитовые зелено- вато-серые тонко мелкозернистые интенсивно биотурбированные Intensive bioturbated fine grained greenish-gray glauconite sandstones	Раковинный детрит, ростры белемнитов Roasters of belemnites, scallop-shell	8,1–16,0 11,1	0,1–58,1 14,6
5	Offshore-Transition zone (OTZ) Переходная зона подвод- ного берегового склона	Песчаники алевролитовые глинистые светло-серые тонко-мелкозернистые, с реликтами мелкой косой слойчатости и волновой ряби Light-gray clay sandstone with relicts of crossbedded and wave ripples	Горизонтально и наклонно ориенти- рованные ходы морских червей. Ихнофа- ции: Cruziana (Asterosoma, Cylin- drihnus, Helminthopsis, Teichichnus, Pa- laeophycus, Planolites, Rosselia, Thalassi- noides). Ichnofossils: Cruziana (Asteroso- ma, Cylihdrihnus, Helminthopsis, Teichichnus, Palaeophycus, Planolites, Rosselia, Thalassinoides)	7,8–19,6 16,4	0,05–24, 5 2,1
6	Distal Lower Shoreface (DLS), Offshore-Transition zone (OTZ) Дистальная часть нижней предфронтальной зоны пляжа, переходная зона подводного берегового склона	Песчаники светло-серые тонко-мелкозернистые интенсивно биотурбированные Intensive bioturbated fine grained light-gray sandstones	Горизонтально и наклонно ориенти- рованные ходы морских червей и мелких ракообразных. Ихнофаии Cruziana (проксимальная часть) и Scolites (Aste- rosoma, Chondrites, Cylihdrihnus, Hel- minthopsis, Ophiomorpha, Palaeophycus, Phicosiphon, Terebellina). Ichnofossils: Cruziana (proximal part) and Scolites (Asterosoma, Chondrites, Cylihdrihnus, Helminthopsis, Ophiomorpha, Palae- ophycus, Phicosiphon, Terebellina)	7,4–24,9 16,6	0,05–68, 1 4,8

На рис. 8 приведена схема типов морских и прибрежно-морских осадочных систем.

Отложения барьерно-островного комплекса (рис. 8) в изученных образцах керна скважин 206, 211 представлены обстановками осадконакопления, характеризующими нижнюю часть профиля пляжа (Lower Shoreface, Distal Lower Shoreface), а также дальнюю зону подводного берегового склона (Offshore) [20].

UOF (Upper Offshore – верхняя (проксимальная) часть дальней зоны подводного берегового склона)

Фациальная ассоциация включает литотип 1. Отложения фациальной ассоциации накапливались в относительно глубоководных условиях проксимальной части дальней зоны подводного берегового склона, на уровне или выше среднего базиса штормовых волн, в условиях умеренной активности волновых/штормовых процессов (рис. 9)

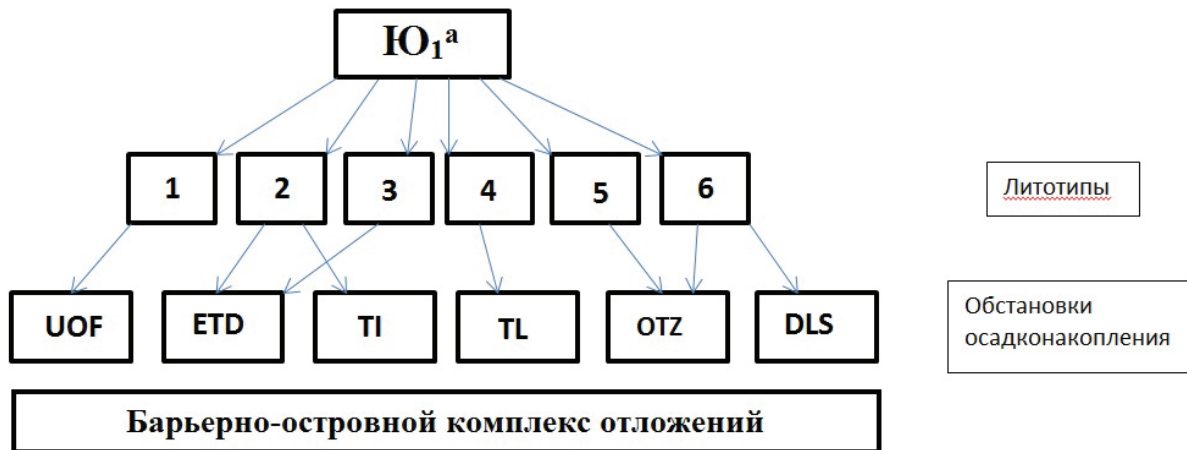


Рис. 7. Сводная блок-схема соответствия литотипов и фаций (Д.С. Бегма)

Fig. 7. General lithotypes & facies block diagram (D.S. Begma)

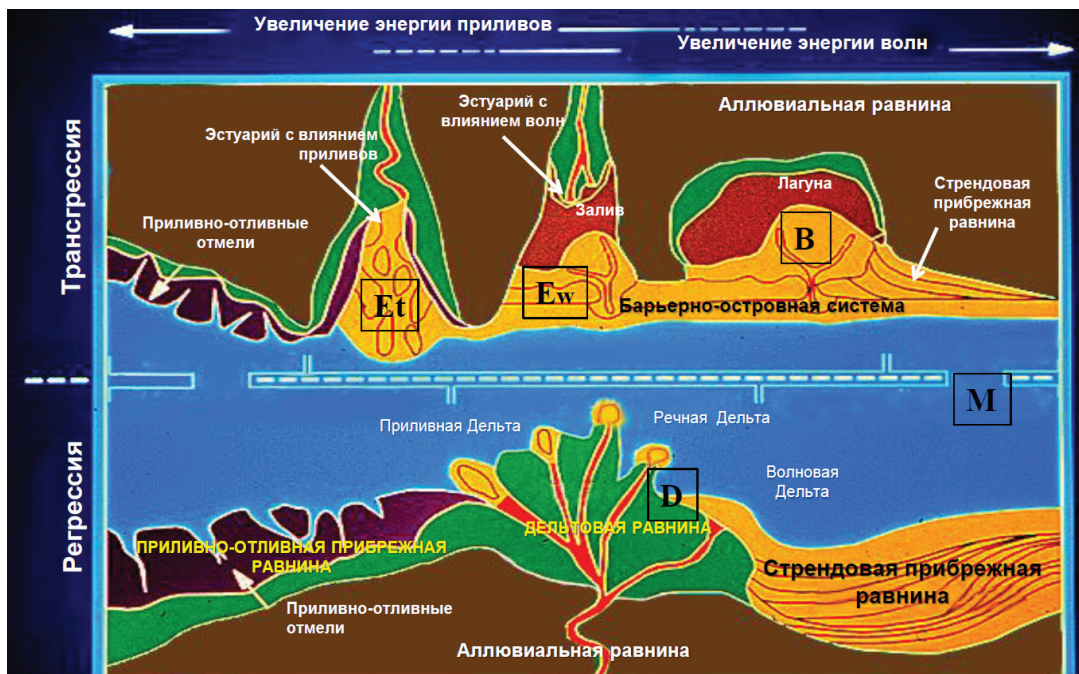


Рис. 8. Типы морских и прибрежно-морских осадочных систем: эстуариевый комплекс отложений (Et – приливно-отливный; Ew – волновой); D – дельтовый комплекс отложений; M – шельфовый комплекс отложений [18, 19]

Fig. 8. Types of marine and coastal-marine depositional systems: estuarine complex of sediments (Et – tidal, Ew – wave); D is the deltaic complex of sediments; M is the shelf complex of sediments [18, 19]

[5–6]. Отложения фациальной ассоциации залегают в разрезе стратиграфически выше аргиллитов дистальной части подводного берегового склона (LOF). Фациальная ассоциация вскрыта керном в нижней части разрезов скважин 211 и 206.

OTZ (Offshore-Transitionzone – переходная зона подводного берегового склона)

Фациальная ассоциация включает литотип 6 и в меньшей степени – 5. Отложения фациальной ассоциации накапливались в пределах переходной зоны подводного берегового склона, располагаю-

щейся выше среднего базиса штормовых волн, в условиях повышенной активности волновых/штормовых процессов (рис. 9). Вместе с тем общий энергетический уровень волновых процессов в этой зоне не перекрывал биотурбационную переработку алеврито-песчаных осадков бентосными организмами. В разрезе отложения фациальной ассоциации переходной зоны залегают стратиграфически выше биотурбированных глинистых алевролитов проксимальной части подводного берегового склона (UOF). Фациальная ассоциация вскрыта керном скважины 211 в нижней части пласта Ю₁^а.

DLSF (Distal Lower Shoreface – дистальная часть нижней предфронтальной зоны пляжа)

Фациальная ассоциация включает литотип 6 и близка по литологическому составу с фациальной ассоциацией переходной зоны (OTZ), отличаясь от последней несколько большей песчаностью отложений и более однородным составом пород (рис. 9). В результате между обеими фациальными ассоциациями существуют постепенные взаимопереходы с трудно проводимыми границами. Отложения фациальной ассоциации накапливались в пределах дистальной части нижней предфронтальной зоны пляжа, располагающейся ниже или на уровне базиса регулярных волн. Условия седиментации характеризовались повышенной активностью волновых и штормовых процессов, которая, тем не менее, не перекрывала скорость биотурбационной переработки осадков бентосными организмами. В разрезе отложения фациальной ассоциации переходной зоны залегают стратиграфически выше биотурбированных глинистых алевролитов проксимальной части подводного берегового склона (UOF). Фациальная ассоциация вскрыта керном скважины 211 в средней части пласта Ю₁^а и в скв. 206 в средней и верхней части пласта Ю₁^а.

ETD (Ebbtidal delta – отливная дельта морского устья приливно-отливной протоки)

Фациальная ассоциация включает литотипы 2 и 3. Накопление отложений отливной дельты связано с выносом песчаного материала в мелководную прибрежную часть моря отливным потоком из приливно-отливной протоки, прорезающей барьерный остров (рис. 9). В отличие от отложений приливной дельты, песчаники которой ассоциируют в разрезе с глинистыми породами центрального

бассейна (CB), в песчаных отложениях отливной дельты мелководно-морского генезиса присутствуют глинистые слойки и тонкие прослои, формировавшиеся в морских условиях. Фациальная ассоциация вскрыта керном скв. 211 в верхней части пласта Ю₁^а, где она подстилается биотурбированными песчаниками дистальной части нижней предфронтальной зоны пляжа (DLSF).

TI (Tidal inlet – приливно-отливная протока барьерно-островной системы)

Фациальная ассоциация включает литотипы 2 и 3. Отложения фациальной ассоциации формировались в мелководных условиях в пределах приливно-отливных протоков, рассекавших барьерно-островную систему (рис. 9). Отложения фациальной ассоциации вскрыты керном скв. 211 в верхней части пласта Ю₁^а.

TL (Transgressive condensed layer – трансгрессивный конденсированный слой)

Фациальная ассоциация включает литотип 4, характеризуется эрозионной подошвой и трансгрессивным строением с постепенной глинизацией отложений вверх по разрезу. Отложения фациальной ассоциации формировались в мелководно-морской обстановке трансгрессивного пляжа, в условиях умеренной активности волновых процессов при отсутствии поступления свежих порций осадков. Низкие темпы седиментации при умеренной гидродинамической активности способствовали усилению роли аутигенного минералообразования и обогащению песчаного осадка глауконитом и раковинным детритом. Фациальная ассоциация вскрыта керном в скв. 211 в кровельной части пласта Ю₁^а.

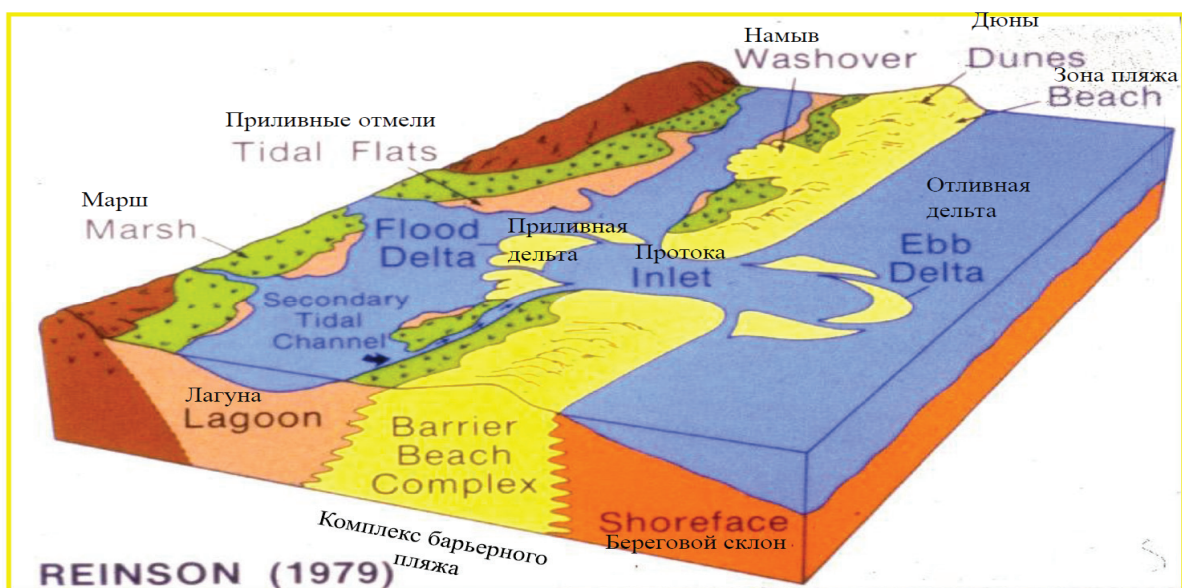


Рис. 9. Блок-диаграмма, показывающая основные обстановки осадконакопления барьерно-островной системы (Reinson G.E., 1979 г. [20])

Fig. 9. Block diagram of the main barrier-island system depositional environment (Reinson G.E., 1979 [20])

Выводы

В целом по работе можно сделать следующие выводы. По результатам седиментологического изучения пласта Ю₁^а по керну скважин 206 и 211 выделено 6 литотипов, которые объединены в более крупные седиментационные комплексы – фациальные ассоциации, отвечающие более крупным по масштабу осадочным системам. Комплекс выделенных ассоциаций в пределах изучаемого

пласта позволил обосновать седиментологическую модель формирования отложений. Пласт Ю₁^а образован в обстановке барьерно-островного комплекса в условиях сноса материала с запада на восток.

На основе результатов седиментологических исследований проведен комплексный анализ литолого-петрофизических данных: рассмотрены диапазоны фильтрационно-ёмкостных свойств выделенных литофаций и фациальных ассоциаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО ИПЦ Маска, 2009. – 376 с.
2. Практические советы по 3D геологическому моделированию / Б.В. Белозёров, А.В. Буторин, П.Н. Герасименко, Е.В. Журавлёва, Р.З. Фаизов. – СПб.: Газпромнефть НТЦ, 2015. – 354 с.
3. Сакс В.Н., Крымгольц Г.Я., Тазихин Н.Н. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР. Т. III. Триасовый, юрский и меловой периоды. – М.: ГУГК, 1968. – 53 л.
4. Чернова О.С. Генетические модели микрофаций континентальных и прибрежно-морских отложений Сибирской платформы // Коллекторы и экраны нефти и газа в мезозойских и палеозойских отложениях Сибирской платформы: Труды СНИИГГИМСа. – 1980. – Вып. 280. – С. 5–26.
5. Характеристика текстурных особенностей пород ачимовской толщи Западной Сибири в связи с моделью ее седиментации / В.Н. Бородкин, А.Р. Курчиков, А.С. Недосекин, А.В. Лукашов, В.И. Самитов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 8. – С. 4–10.
6. Александров В.М., Казанская Д.А., Белкина В.А. Особенности формирования темпеститов в отложениях Викуловской свиты // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 5. – С. 10–15.
7. Костеневич К.А., Федорцов И.В. Обоснование литолого-фациальных закономерностей распространения коллекторов в отложениях сложного строения // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 26–29.
8. Пракойо Ф.С., Лобова Г.А. Прогнозирование фаций и продуктивности юрско-меловых пород-коллекторов юго-востока Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. – Т. 10. – № 3. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/33_2015.pdf (дата обращения 25.11.2016).
9. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. Sand and sandstone. – Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1987. – 618 p.
10. Tucker M.E. Sedimentary petrology. 3rd ed. – Oxford: Blackwell Science, 2001. – 262 p.
11. Einsele G. Sedimentary basins: evolution, facies and sediment budget. 2nd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 2000. – 792 p.
12. Обстановки осадконакопления и фации: В 2-х т. Т. 1. / Х.Г. Реддинг, Дж.Д. Коллинсон, Ф.А. Аллен, Т. Эллиотт, Б.Ш. Шрейбер, Г.Д. Джонсон, К.Т. Болдуин, Б.У. Селлвуд, Х.К. Дженкинс, Д.А.В. Стоу, М. Эдуардз, А.Х.Г. Митчелл / Пер. с англ. под ред. Х. Реддинга. – М.: Мир, 1990. – 352 с.
13. Петерсилье В.И. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Пороскуна, Г.Г. Яценко. – М; Тверь: ВНИГНИ, НИЦ Тверьгеофизика, 2003. – 261 с.
14. Палеогеографические критерии распределения коллекторов в средне-верхнеюрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазонасного бассейна / Е.М. Хабаров, П.А. Ян, Л.Г. Вакуленко, А.Ю. Попов, С.Ф. Плисов // Геология нефти и газа. – 2009. – № 1. – С. 26–33.
15. Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications // Journal of Sedimentary Petrology. – 1992. – V. 62. – № 6. – P. 1130–1146.
16. Leeder M.R. Sedimentology and Sedimentary Basins: from Turbulence to Tectonics. 2nd ed. – Oxford: Willey-Blackwell, 2011. – 608 p.
17. Oblique rift geometry of the West Siberian Basin: tectonic setting for the Siberian flood basalts / M.B. Allen, L. Anderson, R.C. Searle, M. Buslov // Journal of the Geological Society. – 2006. – V. 163. – P. 901–904.
18. Boyd R., Dalrymple R.W., Zaitlin B.A. Classification of clastic coastal depositional environments // Sedimentary Geology. – 1992. – V. 80. – P. 139–150.
19. Reading H.G., Collinson J.D. Clastic coasts // Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy. 3rd ed. / Ed. by H.G. Reading. – Oxford: Wiley Blackwell, 1996. – P. 324–328.
20. Reinson G.E. Facies models 14. Barrier island systems // Geoscience Canada. – 1979. – V. 6. – P. 51–58.

Поступила 28.11.2016 г.

Информация об авторах

Бегма Д.С., аспирант кафедры геологии месторождений нефти и газа Тюменского индустриального университета.

Белкина В.А., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа Тюменского индустриального университета.

UDC 552.143

LITOLOGICAL AND FACIES CHARACTERISTICS OF UPPER JURASSIC SEDIMENTS OF THE T FIELD

Dmitry S. Begma¹,
dsbegma@mail.ru

Valentina A. Belkina¹,
belkina@tsogu.ru

¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarskogo Avenue, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the fact that really all geological issues are solved on the basis of the models which accuracy increases considerably when using sedimentological component. Sedimentological factors control the conditions of formation, placement and quality of a reservoir and caps. It means that consideration of sedimentological models increases the efficiency of exploration for oil and gas, especially, preparation of deposits to development and development drilling.

The main aim of the research is justification of importance of J_1^a formation deposition (formed by sandstones of Upper Jurassic deposits) of T condensate field (Yamal-Nenets Autonomous District) according to the core data performed on two wells.

Research methods: Lithological composition analysis of the rocks, separation of rocks on lithological characteristics on lithotypes, facies analysis, complex analysis of lithological and petrophysical data.

Results. Based on the core data analysis the authors have selected six lithotypes and six sedimentary environments (facies) of deposits of J_1^a . All lithotypes have different reservoir (permeability and porosity) properties. The lithofacies were grouped into larger sedimentary complexes – facies associations. Complex associations allocated within the T field of the studied formation allowed justifying the sedimentological model of deposit formation. Formation of J_1^a sediment accumulated in the barrier-island environment complex from the west to the east. It is shown that lithotypes 3 and 4 have the best filtration-capacitive properties, and lithotype 1 has the worst quality. Lithotype 3 was formed in a Flood Tidal Delta marine and tidal inlet, deposits lithotype 4 was formed in shallow-marine environment during transgression, influenced by moderate activity wave processes.

Key words:

Lithotype, facies, sedimentological model, coastal-marine facies, barrier-island complex, Upper Jurassic deposits.

REFERENCES

- Zakrevsky K.E. *Geologicheskoe 3D modelirovanie* [3D Geological modeling]. Moscow, LLC CPI Maska Publ., 2009. 376 p.
- Belozherov B.V., Butorin, A.V., Gerasimenko P.N., Zhuravleva E.V., Faizov R.Z. *Prakticheskie sovety po 3D geologicheskomu modelirovaniyu* [Practical advice on 3D geological modeling]. St. Petersburg, Gazprom Neft NTC Publ., 2015. 354 p.
- Saks V.N., Krymgolts G.Ya., Tazikhin N.N. *Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR. T. III Triasovy, yurskiy, melovoy periody* [Atlas of lithologic and paleogeographic maps of the USSR. V. III. Triassic, Jurassic and Cretaceous periods]. Moscow, GUGK Publ., 1968. 53 p.
- Chernova O.S. *Geneticheskie modeli microfatsiy kontinentalnykh i pribrezhno-morskikh otlozheniy Sibirskoy platformy* [Genetic microfacies model of Siberian platform continental and coastal-marine deposits]. Novosibirsk, Proceedings SNIIGGiMS. Novosibirsk, 2007. Iss. 280, pp. 5–26.
- Borodkin V.N., Kurchikov A.R., Nedosekin A.S., Lukashov A.V., Samitov V.I. *Kharakteristika tekturnykh osobennostey porod achimovskoy tolshchi Zapadnoy Sibiri v svyazi s modelu ee sedimentatsii* [Textural rocks features of Western Siberia Achimov strata in connection with its sedimentation model]. *Bulletin of the Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2016, no. 8, pp. 4–10.
- Aleksandrov V.M., Kazanskaya D.A., Belkina V.A. *Osobennosti formirovaniya tempestitov v otlozheniyakh Vykulovskoy svity* [Features of deposits formations in tempestitites Vikulov suite]. *Bulletin of the Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2015, no. 5, pp. 10–15.
- Kostenevich K.A., Fedortsov I.V. *Obosnovanie litologo-fatsialnykh zakonomernostey rasprostraneniya kollektorov v otlozheniyakh slozhnogo stroeniya* [Justification of lithofacies patterns in reservoir distribution in the complex structure sediments]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2011, no. 4, pp. 26–29.
- Prakoyo F.S., Lobova G.A. *Prediction of facies and productivity of the Jurassic-Cretaceous reservoir rocks in the south-east of Western Siberia. Neftgazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2015, vol. 10, no. 3. In Rus. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/33_2015.pdf (accessed 25 November 2016).
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. *Sand and sandstone*. Heidelberg; New York, Springer-Verlag, 1987. 618 p.
- Tucker M.E. *Sedimentary petrology*. 3rd ed. Oxford, Blackwell Science, 2001. 262 p.
- Einsele G. *Sedimentary basins: evolution, facies and sediment budget*. 2nd ed. Berlin, Springer-Verlag, 2000. 792 p.
- Reading H.G., Collinson J.D. *Obstanovki osadkonakopleniya i fatsii* [Clastic coasts. Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy]. Moscow, Mir Publ., 1990. 352 p.
- Petersile V.I. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefti i gaza obemnym metodom* [Guidelines for calculating oil and gas geological reserves by volumetric method]. Eds. Petersile V.I., Poroskuna V.I., Yatsenko G.G. Moscow; Tver, VNIGNI, SPC Tvergeofizika Publ., 2003. 261 p.
- Khabarov E.M., Yan P.A., Vakulenko L.G., Popov A.Yu., Pliov S.F. *Paleogeograficheskie kriterii raspredeleniya kollektorov v sredne-verkhneyurskikh otlozheniyakh Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseyna* [Paleogeographic criteria of reservoir distribution in Middle-Upper Jurassic deposits of south of West-Siberian oil-and-gas-bearing basin]. *Geologiya nefti i gaza*, 2009, no. 1, pp. 26–33.
- Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R. *Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, vol. 62, no. 6, pp. 1130–1146.
- Leeder M.R. *Sedimentology and Sedimentary Basins: from Turbulence to Tectonics*. 2nd ed. Oxford, Wiley-Blackwell, 2011. 608 p.
- Allen M.B., Anderson L., Searle R.C., Buslov M. *Oblique rift geometry of the West Siberian Basin: tectonic setting for the Siberia*

- an flood basalts. *Journal of the Geological Society*, 2006, vol. 163, pp. 901–904.
18. Boyd R., Dalrymple R.W., Zaitlin, B.A. Classification of clastic coastal depositional environments. *Sedimentary Geology*, 1992, vol. 80, pp. 139–150.
19. Reading H.G., Collinson J.D. Clastic coasts. *Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy*. 3rd ed. Ed. H.G. Reading. Oxford, Wiley Blackwell, 1996. 704 p.
20. Reinson G.E. Facies models 14. Barrier island systems. *Geoscience Canada*, 1979, vol. 6, pp. 51–58.

Received: 28 November 2016.

Information about the authors

Dmitry S. Begma, postgraduate, Tyumen Industrial University.

Valentina A. Belkina, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

УДК 621.313.333:62–83

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ

Боловин Евгений Владимирович¹,
bolovinev@mail.ru

Глазырин Александр Савельевич¹,
asglazyrin@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследований обусловлена тем, что 80 % нефти Российской Федерации добывается с помощью установок электроприводных центробежных насосов и этот показатель растет, при этом удельное соотношение скважин, оснащенных установками электроприводных центробежных насосов, в общем фонде остается практически неизменным и является не самым высоким – около 34 %. Необходимо отметить, что поддержание оптимального в известном смысле режима работы электропривода, например максимальный объем нефтедобычи при минимальных затратах электроэнергии, зависит не только от правильной настройки уставок и корректной обработки внешних воздействий, но и от процессов самонастройки адаптивной системы управления, включая решение задач идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей в режиме реального времени.

Цель: разработка и апробирование метода идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей в режиме реального времени на основе алгебраических методов идентификации и дискретных моделей.

Методы исследований основаны на использовании систем дифференциальных и разностных уравнений, алгебраических методов идентификации, построении дискретных математических моделей погружных асинхронных электродвигателей.

Результаты. Реализован программно-аппаратный комплекс для мониторинга параметров погружных асинхронных электродвигателей, и проведена проверка его эффективности путем математического моделирования. Сделан вывод о целесообразности использования программно-аппаратного комплекса для мониторинга параметров погружных асинхронных электродвигателей в режиме реального времени. Перспективы применения комплекса авторы видят в возможности усовершенствовать интеллектуальные системы управления электроцентробежных насосов, что приведет к увеличению эффективности эксплуатации, снижению электропотребления электропривода, а соответственно уменьшению удельных затрат на добычу единицы нефтепродукта, а также увеличению наработки на отказ погружных электродвигателей за счет непрерывного мониторинга их состояния.

Ключевые слова:

Идентификация параметров, погружной асинхронный электродвигатель, дискретная модель, интеллектуальная система управления, погружной электроцентробежный насос.

Введение

В последние годы существенно меняется структура запасов нефти, добываемой в Российской Федерации, что связано с тем, что большинство легкодоступных нефтегазовых месторождений находятся на завершающей стадии разработки [1]. Вместе с тем совершенствуются технологии извлечения нефтегазовых ресурсов [2]. Соответственно становится привлекательной разработка новых месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, истощенных нефтяных запасов, нефтегазовых месторождений с неоднородными пластами, разведка и разработка скважин на Арктическом шельфе [3].

Несмотря на существующие сложности, по результатам анализа нефтегазовой отрасли российской медиагруппой «РосБизнесКонсалтинг» по данным за 2013 г. в Российской Федерации в среднем вводится около 300 новых месторождений каждый год в течение последних пяти лет, при этом увеличивается средняя проходка в бурении по нефтяной отрасли в среднем на 2000 тыс. м ежегодно [1, 4]. На основе тезисов выступления директора Департамента консалтинговой компании «Делойт» СНГ, можно утверждать, что за 2014 г. было добыто 526 млн т нефти, при этом прослеживается

динамика ежегодного роста добычи на 4–10 млн т с начала 2007 г. [5]. Данные, представленные ОПЕК в октябре 2016 г. [6], подтверждают такую динамику роста: количество добытой нефти в Российской Федерации за 2015 г. составило 10,85 тыс. баррелей в день, а к октябрю 2016 г. данная цифра уже составляла 11,04 тыс. баррелей в день.

Аналогичная динамика роста объемов затрат на бурение – \$1 млрд, проводимых операций, связанных с износом и увеличением фонда скважин, – \$0,1...0,5 млрд [5]. На основании [1, 6] можно утверждать, что к концу 2016 г. расходы на подземные ремонты увеличились по сравнению с 2015 г. на 11 % и составили 43,9 млрд р., на капитальные ремонты: рост – 20 %, расход за год – 130,9 млрд р.

Необходимо понимать, что приведенные цифры являются затратами на добычу нефтепродуктов, и рост затрат обусловлен ростом доли трудноизвлекаемых запасов. На конец 2014 г. доля трудноизвлекаемых запасов составляет 55 %, при этом средняя динамика роста 3 % в год [5].

Для уменьшения затрат используют современные технологии и разработки, направленные на со-

вершенствование уже созданных способов, предназначенных для увеличения нефтеотдачи и уменьшения затрат на единицу добытой нефти и повышение средних дебитов, что приводит к сокращению числа малодебитных скважин, входящих в нерентабельный фонд [2, 7, 8].

В настоящее время почти 80 % нефти Российской Федерации добывается с помощью установок электроприводных центробежных насосов (УЭЦН), и этот показатель растет [9], при этом удельное соотношение скважин оснащенных УЭЦН в общем фонде остается практически неизменным и является не самым высоким – около 34 % [10]. Установки скважных насосов оснащаются электроприводами переменного тока, которые можно разделить на три основных типа [11]:

- 1) частотно-регулируемый асинхронный электропривод с преобразователем частоты;
- 2) частотно-регулируемый электропривод по схеме вентильного двигателя на базе быстроходного синхронного двигателя;
- 3) асинхронный электропривод с устройствами плавного пуска по схеме «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный электродвигатель».

Стоит отметить, что производительность установок скважных насосов в большой степени зависит от эффективности работы их системы управления [12]. Современную станцию управления погружным насосом можно рассматривать как интеллектуальное электротехническое устройство, позволяющее контролировать рабочие параметры добычи, осуществлять обмен данными между рабочей установкой и системой управления, управлять технологическим процессом нефтедобычи в режиме реального времени [13].

В последние годы активно разрабатываются интеллектуальные станции управления установками электроприводных центробежных насосов (ИСУ УЭЦН). Если сравнивать интеллектуальную станцию с обычными станциями управления, то оба этих вида позволяет успешно решать основные задачи управления, однако ИСУ УЭЦН имеет еще дополнительные возможности, такие как оптимизация режимов работы УЭЦН с целью максимизации нефтедобычи [13] или снижения удельного электропотребления на тонну добываемой нефти. Положительный эффект от ИСУ был доказан испытаниями на Приобском и Мало-Балыкском месторождениях ООО «РН-Юганскнефтегаз» [14], который выразился в увеличении среднего прироста добываемой жидкости на 37 м³ в сутки и добываемой нефти на 24 т/сут при том же потреблении электроэнергии, что позволило сэкономить 12 млн р. в год с одной установки [15]. При этом испытания сводились лишь к поддержанию заданного режима работы.

Поддержание заданного режима работы электропривода зависит не только от правильной настройки уставок и корректной отработки внешних воздействий, но и от процессов самонастройки адаптивной системы управления в режиме реаль-

ного времени. Процесс самонастройки зависит от текущих значений параметров погружных электродвигателей (ПЭД), таких как активное сопротивление и индуктивность статорной обмотки, взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, активное сопротивление и индуктивность роторной обмотки. Однако при наладке асинхронных электроприводов измеряют лишь активное сопротивление статорной обмотки, другие же параметры берутся из каталожных данных, которые являются расчетными и могут сильно отличаться от реальных значений [16]. Ситуация с предварительным определением параметров погружных двигателей является наиболее сложной, так как данный тип двигателей, в отличие от асинхронных двигателей общего назначения, таких как 5А, АИР и др., не имеет отработанных эмпирических методик определения параметров схемы замещения по каталожным данным.

В настоящее время в РФ на месторождениях Западной Сибири для перевода скважин из фонда малорентабельных в фонд действующих применяется технология циклической эксплуатации добывающих нефтяных скважин (ЦЭС). По данным ОАО «Самотлорнефтегаз», внедрение технологии ЦЭС позволило увеличить дебит на 10–15 %, снизить потребление электроэнергии в 2–3 раза, увеличить межремонтный период (МРП) в 1,5–2 раза и сэкономить на удельной стоимости управляемых УЭЦН [17].

Однако применение технологии ЦЭС сопряжено с рядом трудностей, одной из которых является зависимость параметров асинхронных электродвигателей от теплового состояния и режима работы. Например, в режиме прямого пуска индуктивность может измениться на 30–40 %, а активное сопротивление ротора – более чем в полтора раза [18]. В свою очередь активное сопротивление статорной обмотки, зависящее от теплового состояния, может изменяться на 20–30 % в процессе работы двигателя [18]. Эти изменения в УЭЦН усугубляются при повышенных температурах внутри скважин – более 120 °С [19]. Решение возникших при реализации технологии ЦЭС трудностей возможно только при применении ИСУ УЭЦН. Однако при проектировании ИСУ следует учитывать, что большая часть переменных состояния электродвигателей и электромагнитных параметров недоступна для прямого измерения. При эксплуатации ПЭД не представляется возможным измерить потокосцепления статора и ротора, индуктивность и активное сопротивление роторной обмотки, а также становятся недоступными для прямого измерения даже параметры статора.

Отсутствие адекватного мониторинга в режиме реального времени параметров ПЭД снижает эффективность работы ИСУ УЭЦН.

Для решения данной проблемы предлагается программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяющий проводить мониторинг параметров ПЭД в режиме реального времени.

Данный ПАК позволит:

- 1) усовершенствовать ИСУ УЭЦН, что приведет к улучшению эффективности эксплуатации, снижению электропотребления двигателя, а соответственно уменьшению удельных затрат на добычу единицы нефтепродукта;
- 2) увеличить наработку на отказ ПЭД за счет непрерывного контроля, диагностики и управления ПЭД, вследствие чего увеличится МРП УЭЦН, что приведет к уменьшению эксплуатационных затрат на спускоподъемные операции [20].

Разработка и проверка работоспособности метода идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей

Основой ПАК является принцип динамической идентификации переменного состояния и параметров [21] асинхронных двигателей с помощью алгебраических методов [22, 23] и дискретных моделей [24–26]. Рассмотрим более подробно разработку метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей.

Для создания дискретной модели для идентификации параметров погружных асинхронных двигателей воспользуемся системой уравнений, описывающей электромагнитные и электромеханические процессы, происходящие в асинхронном двигателе и представленной в неподвижной системе координат $\alpha\beta$:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} U_{1\alpha}(t) - \frac{R'_1}{\sigma L_1} i_{1\alpha}(t) + \\ &+ \frac{R'_2 L_m}{\sigma L_1 L_2^2} \Psi_{2\alpha}(t) + \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \omega(t) \Psi_{2\beta}(t); \\ \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} U_{1\beta}(t) - \frac{R'_1}{\sigma L_1} i_{1\beta}(t) + \\ &+ \frac{R'_2 L_m}{\sigma L_1 L_2^2} \Psi_{2\beta}(t) + \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \omega(t) \Psi_{2\alpha}(t); \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} &= -\frac{R'_2}{L_2} \Psi_{2\alpha}(t) + \\ &+ \frac{R'_2 L_m}{L_2} i_{1\alpha}(t) - z_p \omega(t) \Psi_{2\beta}(t); \\ \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} &= -\frac{R'_2}{L_2} \Psi_{2\beta}(t) + \\ &+ \frac{R'_2 L_m}{L_2} i_{1\beta}(t) + z_p \omega(t) \Psi_{2\alpha}(t); \\ M_{эм}(t) &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} z_p (\Psi_{2\alpha}(t) i_{1\beta}(t) - \Psi_{2\beta}(t) i_{1\alpha}(t)); \\ \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{1}{J} (M_{эм}(t) - M_c(t)), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где R_1 – активное сопротивление, Ом; $L_1=L_{1\sigma}+L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора,

Гн; $L_2=L'_{2\sigma}+L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн; L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины, Гн; R'_2 – приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора, Ом; σ – коэффициент рассеяния ротора, о.е; $R'_s = R_1 + R'_2 \frac{L_m^2}{L_2^2}$ – эквивалентное

сопротивление двигателя, Ом; $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – составляющие вектора тока статора в системе координат $\alpha\beta$ по осям α и β , соответственно; $U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ – составляющие вектора напряжения статора по оси α и β , соответственно; z_p – число пар полюсов электродвигателя; J – момент инерции двигателя, кг·м².

Данная система для решения задач идентификации алгебраическим методом является громоздкой и неэффективной из-за наличия переменных состояний ротора, измерение которых в реальных условиях технически нецелесообразно, а также наличием большого числа уравнений, что в конечном итоге приведет к увеличению вычислительных мощностей. Поэтому, следуя рекомендациям, предложенным в работе [27], систему (1) можно преобразовать следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} U_{1\alpha}(t) - \gamma i_{1\alpha}(t) + \\ &+ \frac{\beta}{T_2} \Psi_{2\alpha}(t) + z_p \beta \omega(t) \Psi_{2\beta}(t); \\ \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} U_{1\beta}(t) - \gamma i_{1\beta}(t) + \\ &+ \frac{\beta}{T_2} \Psi_{2\beta}(t) + z_p \beta \omega(t) \Psi_{2\alpha}(t); \\ \Psi_{2\alpha}(t) &= \int \left(\frac{L_m}{T_2} i_{1\alpha}(t) - \frac{\Psi_{2\alpha}(t)}{T_2} - \right. \\ &\left. - z_p \omega(t) \Psi_{2\beta}(t) \right) dt; \\ \Psi_{2\beta}(t) &= \int \left(\frac{L_m}{T_2} i_{1\beta}(t) - \frac{\Psi_{2\beta}(t)}{T_2} + \right. \\ &\left. + z_p \omega(t) \Psi_{2\alpha}(t) \right) dt; \\ \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \times \\ &\times \frac{z_p}{J} (\Psi_{2\alpha}(t) i_{1\beta}(t) - \Psi_{2\beta}(t) i_{1\alpha}(t)) - \frac{M_c(t)}{J}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2}$, $\gamma = \frac{R_1}{\sigma L_1} + \frac{R'_2 L_m^2}{\sigma L_1 L_2^2}$, $\frac{1}{T_2} = \frac{R'_2}{L_2}$, T_2 – постоянная времени ротора, с.

После многочисленных постановок и замен в системе (2) получаем уравнение:

$$K_1 i_{1\alpha}(t) + K_2 U_{1\alpha}(t) + K_3 z_p \omega(t) i_{1\beta}(t) + \\ + K_4 \left(\frac{dU_{1\alpha}(t)}{dt} + z_p \omega(t) U_{1\beta}(t) \right) + \\ + K_5 \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{d^2 i_{1\alpha}(t)}{dt^2} + z_p \omega(t) \frac{di_{1\beta}(t)}{dt},$$

где

$$K_1 = -\frac{R_1}{\sigma L_1 T_2}, \quad K_2 = \frac{1}{\sigma L_1 T_2}, \quad K_3 = \frac{1}{\sigma L_1 T_2}, \\ K_4 = \frac{1}{\sigma L_1}, \quad K_5 = \frac{R_1 L_2 + R_2' L_1}{\sigma L_1 L_2}.$$

Далее производим преобразование Лапласа с учетом нулевых начальных условий:

$$K_1 i_{1\alpha}(s) + K_2 U_{1\alpha}(s) + K_3 z_p \omega(s) i_{1\beta}(s) + \\ + K_4 (U_{1\alpha}(z)s + z_p \omega(s) U_{1\beta}(s)) K_5 i_{1\alpha}(s) s = \\ = i_{1\alpha}(s) s^2 + z_p \omega(s) i_{1\beta}(s) s. \quad (3)$$

Одной из основных проблем при составлении дискретной модели погружного асинхронного электродвигателя, а соответственно и нахождение оценок данного двигателя, является преобразование производных токов и напряжений. Авторами было доказано, что для решения данной проблемы наиболее перспективным и эффективным является применение билинейного преобразования [28]. Алгоритм составления дискретной модели с помощью билинейного преобразования и проверка его эффективности по сравнению с другими методами преобразования производных в решении задач идентификации представлен в работе [28]. Таким образом, с учетом билинейного преобразования

$s \rightarrow \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, система (3) принимает вид:

$$K_1 i_{1\alpha}(z) + K_2 U_{1\alpha}(z) + K_3 z_p \omega(z) i_{1\beta}(z) + \\ + K_4 \left(U_{1\alpha}(z) \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + z_p \omega(z) U_{1\beta}(z) \right) + \\ + K_5 i_{1\alpha}(z) \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} = \\ = i_{1\alpha}(z) \left(\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)^2 + z_p \omega(z) i_{1\beta}(z) \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}.$$

Избавимся от знаменателя:

$$K_1 i_{1\alpha}(z)(1+z^{-1})^2 + K_2 U_{1\alpha}(z)(1+z^{-1})^2 + \\ + K_3 z_p \omega(z) i_{1\beta}(z)(1+z^{-1})^2 + \\ + K_4 \left(U_{1\alpha}(z) \frac{2}{\Delta t} (1-z^{-1})(1+z^{-1}) + \right. \\ \left. + z_p \omega(z) U_{1\beta}(z)(1+z^{-1})^2 \right) + \\ + K_5 i_{1\alpha}(z) \frac{2}{\Delta t} (1-z^{-1})(1+z^{-1}) = i_{1\alpha}(z) \frac{2}{\Delta t} (1-z^{-1})^2 + \\ + z_p \omega(z) i_{1\beta}(z) \frac{2}{\Delta t} (1-z^{-1})(1+z^{-1}).$$

Раскроем скобки и приведем подобные:

$$K_1 (i_{1\alpha}(z) + 2i_{1\alpha}(z)z^{-1} + i_{1\alpha}(z)z^{-2}) + \\ + K_2 (U_{1\alpha}(z) + 2U_{1\alpha}(z)z^{-1} + U_{1\alpha}(z)z^{-2}) + \\ + K_3 z_p \omega(z) (i_{1\beta}(z) + 2i_{1\beta}(z)z^{-1} + i_{1\beta}(z)z^{-2}) + \\ + K_4 \left(\frac{2}{\Delta t} (U_{1\alpha}(z) - U_{1\alpha}(z)z^{-2}) + \right. \\ \left. + z_p \omega(z) (U_{1\beta}(z) + 2U_{1\beta}(z)z^{-1} + U_{1\beta}(z)z^{-2}) \right) + \\ + K_5 \frac{2}{\Delta t} (i_{1\alpha}(z) - i_{1\alpha}(z)z^{-2}) = \\ = \frac{2}{\Delta t} (i_{1\alpha}(z) - 2i_{1\alpha}(z)z^{-1} + i_{1\alpha}(z)z^{-2}) + \\ + z_p \omega(z) \frac{2}{\Delta t} (i_{1\beta}(z) - i_{1\beta}(z)z^{-2}).$$

Необходимо понимать, что z^{-1} является ничем иным, как задержкой на один шаг дискретизации Δt [22, 29]. Для получения оценок параметров асинхронного двигателя необходимо составить дискретную модель в форме линейной дискретной системы алгебраических уравнений:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon},$$

где \mathbf{B} – матрица-вектор зависимых переменных размером 5×1 с элементами вида:

$$b_{k1} = \frac{2}{\Delta t} \left(\begin{array}{l} i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) - \\ -2i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - \Delta t) + \\ + i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t) \end{array} \right) + \\ + z_p \omega(n\Delta t - (k-1)\Delta t) \times \\ \times \frac{2}{\Delta t} \left(\begin{array}{l} i_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) - \\ -i_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t) \end{array} \right), \quad k = \overline{1,5};$$

\mathbf{A} – матрица регрессоров размером 5×5 с элементами вида:

$$a_{k1} = i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) + 2i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - \Delta t) + \\ + i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t), \quad k = \overline{1,5}; \\ a_{k2} = U_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) + \\ + 2U_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - \Delta t) + \\ + U_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t), \quad k = \overline{1,5}; \\ a_{k3} = z_p \omega(n\Delta t - (k-1)\Delta t) \times \\ \times \left(\begin{array}{l} i_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) + \\ + 2i_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - \Delta t) + \\ + i_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t) \end{array} \right), \quad k = \overline{1,5}; \\ a_{k4} = \frac{2}{\Delta t} \left(\begin{array}{l} U_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) - \\ -U_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t) \end{array} \right) + \\ + z_p \omega(n\Delta t - (k-1)\Delta t) \times \\ \times \left(\begin{array}{l} U_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) + \\ + 2U_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - \Delta t) + \\ + U_{1\beta}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t) \end{array} \right), \quad k = \overline{1,5};$$

$$a_{k5} = \frac{2}{\Delta t} \left(i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t) - i_{1\alpha}(n\Delta t - (k-1)\Delta t - 2\Delta t) \right), k = \overline{1,5};$$

$$X = [\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4, \hat{K}_5]^T$$

– вектор коэффициентов регрессии; $\varepsilon = [\varepsilon(n\Delta t), \varepsilon(n\Delta t - \Delta t), \varepsilon(n\Delta t - 2\Delta t), \varepsilon(n\Delta t - 3\Delta t), \varepsilon(n\Delta t - 4\Delta t)]^T$ – вектор ошибок.

Для нахождения оценок коэффициентов $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4, \hat{K}_5$ воспользуемся методом наименьших квадратов [30]:

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T B + \varepsilon.$$

После того как были найдены оценки коэффициентов, необходимо вычислить оценки электромагнитных параметров асинхронного двигателя следующим образом:

$$\hat{R}_1 = -\frac{\hat{K}_3}{\hat{K}_4}, \hat{R}'_2 = \frac{\hat{K}_3 - \hat{K}_5}{\hat{K}_4}, \hat{L}_1 = \frac{\hat{K}_3 - \hat{K}_5}{\hat{K}_2}, \hat{\sigma} = -\frac{\hat{R}_1}{\hat{K}_3 \hat{L}_1},$$

$$\hat{L}_m = \hat{L}_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\hat{K}_4} \hat{L}_1}, \hat{T}_2 = \frac{1}{\hat{K}_2 \hat{\sigma} \hat{L}_1}, \hat{L}_2 = \frac{\hat{T}_2}{\hat{R}'_2},$$

где \hat{R}_1 – оценка активного сопротивления обмотки статора, Ом; \hat{L}_1 – оценка эквивалентной индуктивности обмотки статора, Гн; \hat{R}'_2 – оценка приведенного к статору активного сопротивления обмотки ротора, Ом; \hat{L}_2 – оценка эквивалентной индуктивности обмотки ротора, Гн; \hat{L}_m – оценка индуктивности, обусловленной магнитным потоком в воздушном зазоре электродвигателя, Гн; $\hat{\sigma}$ – оценка коэффициента рассеяния ротора, о.е.; \hat{T}_2 – оценка постоянной времени ротора, с; $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4, \hat{K}_5$ – специальные коэффициенты, необходимые для определения оценок параметров асинхронного двигателя

$$\begin{aligned} & (\hat{K}_1 \ \hat{K}_2 \ \hat{K}_3 \ \hat{K}_4 \ \hat{K}_5)^T = \\ & = \mathbf{f} \left(i_{1\alpha}, i_{1\beta}, U_{1\alpha}, U_{1\beta}, \omega, \frac{dU_{1\alpha}}{dt}, \frac{di_{1\beta}}{dt}, \frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2}, z_p \right), \end{aligned}$$

где $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – составляющие вектора тока статора в системе координат $\alpha\beta$ по осям α и β , соответственно; $U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ – составляющие вектора напряжения

статора по оси α и β , соответственно; $\frac{d}{dt}, \frac{d^2}{dt^2}$ – первая и вторая производная соответственно; z_p – число пар полюсов электродвигателя.

Проверка работоспособности разработанного ПАК для мониторинга ПЭД УЭЦН проводилась на модели погружного асинхронного электродвигателя ЭДБТ28–117В5, паспортные данные и параметры которого приведены в [12].

Параметры схемы замещения ПЭД ЭДБТ28–117В5: приведенное активное сопротивление ротора $R'_2=1,012$ Ом; активное сопротивление статора $R_1=1,15$ Ом; эквивалентной индуктивности обмотки статора $L_1=0,108$ Гн; эквивалентной индуктивности обмотки ротора $L_2=0,108$ Гн; результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины, $L_m=0,105$ Гн.

В ходе моделирования, с применением разработанного ПАК, были получены переходные характеристики оценок активного сопротивления обмотки статора \hat{R}_1 (рисунок, а), приведенного к статору активного сопротивления ротора \hat{R}'_2 (рисунок, б), эквивалентной индуктивности обмотки статора \hat{L}_1 (рисунок, в), эквивалентной индуктивности обмотки ротора \hat{L}_2 (рисунок, г), индуктивности, обусловленной магнитным потоком в воздушном зазоре электродвигателя, \hat{L}_m (рисунок, д).

Для анализа качества процесса оценивания параметра x ($\hat{x}=\hat{R}_1, \hat{R}'_2, \hat{L}_1, \hat{L}_2, \hat{L}_m, \hat{T}_2$ соответственно) на рисунке рассмотрена интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания параметра:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{1}{j_{\text{кон.}} - j_{\text{нач.}}} \sum_{k=j_{\text{нач.}}}^{j_{\text{кон.}}} \left(\frac{x - \hat{x}_k}{x} \right)^2} \cdot 100 \%,$$

где $j_{\text{нач.}}=80000\Delta t$ – начальная точка режима оценивания и $j_{\text{кон.}}=200000\Delta t$ – конечная точка режима оценивания параметров асинхронного электродвигателя, с учетом шага дискретизации Δt [29, 30]. Все результаты сведены в таблицу.

Таблица. Результаты идентификации параметров

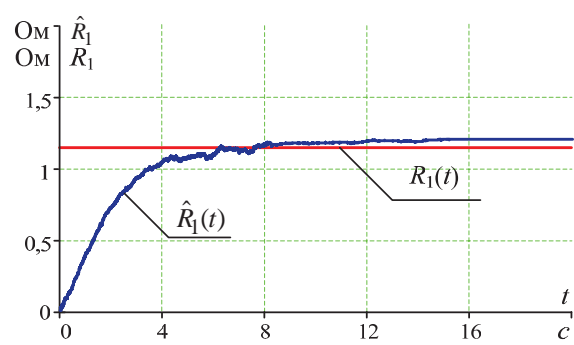
Table. Parameters identification results

Оценки параметров Parameters estimate	\hat{R}_1	\hat{R}'_2	\hat{L}_1	\hat{L}_2	\hat{L}_m
	Ом/Ohm		Гн/H		
Значение/Value	1,22	0,97	0,113	0,105	0,102
$\delta, \%$	4,7	4,1	4,6	2,7	3,8

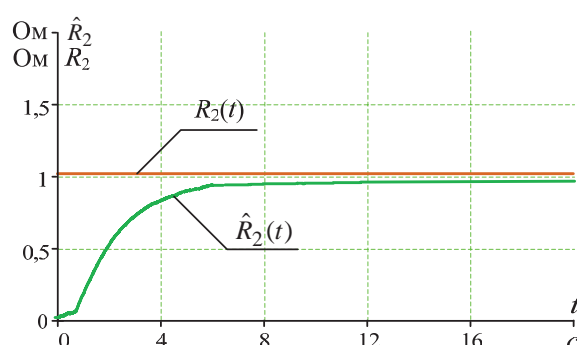
Проведенный анализ полученных результатов (рисунок, таблица) позволяет утверждать, что все полученные оценки являются устойчивыми и несмещенными (рисунок), интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания параметров погружного асинхронного электродвигателя составляет не более 5 % (таблица), что говорит о работоспособности разработанного метода идентификации и возможности его применения для мониторинга параметров ПЭД УЭЦН.

Выводы

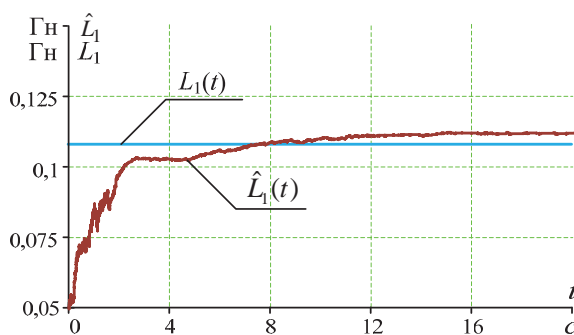
1. Разработан метод идентификации, позволяющий проводить мониторинг параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти в режиме реального времени.
2. Проверка работоспособности разработанного метода идентификации на основе математического моделирования погружных асинхронных электродвигателей показала, что полученные оценки являются устойчивыми и несмещенными, интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания параметров погружного асинхронного электродвигателя составляет не более 5 %.
3. Полученные результаты рекомендуются к использованию в интеллектуальных станциях управления установками электроприводных центробежных насосов для добычи нефти.



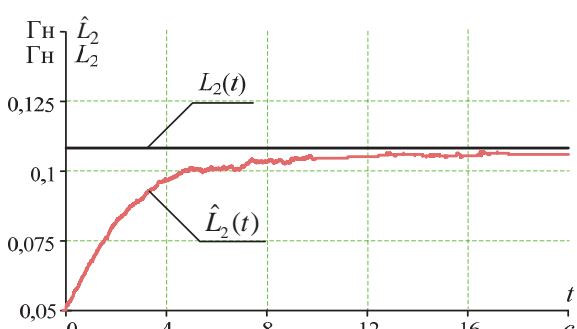
a/a



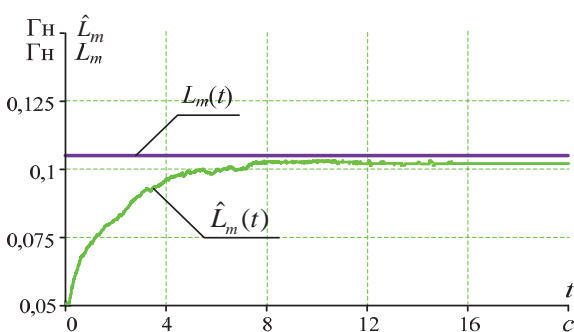
б/б



в/с



г/д



д/е

Рисунок. Переходные характеристики оценок параметров: а) активного сопротивления обмотки статора R_1 ; б) приведенного к статору активного сопротивления ротора R_2 ; в) эквивалентной индуктивности обмотки статора \hat{L}_1 ; г) эквивалентной индуктивности обмотки ротора \hat{L}_2 ; д) индуктивности, обусловленной магнитным потоком в воздушном зазоре электродвигателя, \hat{L}_m

Figure. Transient characteristics of estimating the parameters of: а) active resistance of stator winding R_1 ; б) rotor active resistance reduced of stator R_2 ; в) equivalent inductance of stator winding \hat{L}_1 ; г) equivalent inductance of rotor winding \hat{L}_2 ; е) inductance caused by magnetic flux in the machine air gap \hat{L}_m

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deloitte. Oilfield services market conditions and trends 2016. – London: Deloitte & Touche Regional Consulting Services Limited, October 2016. – 16 p.
2. Ивановский В.Н. Анализ современного состояния и перспектив развития скважных насосных установок для добычи нефти // Территория Нефтегаз. – 2007. – № 11. – С. 36–47.
3. Разработка месторождения «Приразломное». URL: <http://shelf-neft.gazprom.ru/d/blockonthemainpage/04/4/prezentatsiya-proekta-prirazlomnoe.pdf> (дата обращения: 18.12.2016).
4. Российский рынок нефтесервисных услуг 2014. Аналитический обзор / под ред. Е. Миролюбовой. – М.: РБК, 2014. – 218 с.
5. Моисеева Е.В. Состояние и перспективы развития нефтесервисного рынка России 2014 // Нефтегазовая Вертикаль. – 2014. – № 22. – С. 64–72.
6. ОПЕК Monthly Oil Market Report. – Vienna: Organization of the Petroleum Exporting Countries, November 2016. – 106 p.
7. Лопатин Р.Р. Модели и алгоритмы частотно-регулируемого процесса расклинивания электроцентробежного насоса при добыче нефти в осложненных условиях: дис. ... канд. тех. наук. – Томск, 2011. – 140 с.
8. Deloitte. Oilfield services market conditions and trends 2016. – London: Deloitte & Touche Regional Consulting Services Limited, June 2016. – 16 p.
9. Ивановский В.Н., Сабиров А.А. Скважинные насосные установки для добычи нефти – что нового? // Территория Нефтегаз. – 2010. – № 10. – С. 14–22.
10. Скважные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров и др. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2002 – 824 с.
11. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий и др. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 487 с.
12. Сипайлов В.А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 196 с.

13. Способ эксплуатации малодебитной скважины элеткронасосом с частотно-регулируемым приводом: пат. РФ № 2119578.; заявл. 19.06.97; опубл. 27.09.98. Бюл. № 12. – 12 с.
14. Мельниченко В.Е. Увеличение эффективности механизированной добычи нефти // Нефтегазовая Вертикаль. – 2013. – № 11. – С. 62–66.
15. Худяков Д.Л., Маркелов Д.В. Интеллектуальные станции управления УЭЦН // Нефтегазовая вертикаль. – 2011. – № 11. – С. 64–68.
16. Макаров В.Г. Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2011. – 162 с.
17. Антипин М.Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО «Самотлорнефтегаз» // Инновации и новые технологии в области механизированной добычи нефти. – 2011. – № 5. – С. 74–81.
18. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных двигателей: дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2005. – 133 с.
19. Оборудование для добычи нефти с высоким содержанием свободного газа и опыт его эксплуатации / Ш.Р. Агеев, А.В. Берман, А.М. Джалаев, А.Н. Дроздов А.Г. Кан, В.Н. Маслов // Техника и технология добычи. Проблемы и пути их решения. – 2005. – № 1. – С. 1–10.
20. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины / А.В. Федотов, В.Г. Хомченко, В.В. Жильцов и др. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 175 с.
21. Tkachuk R. Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Document Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms // 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – Tomsk, 2012. – V. 2. – P. 586–589.
22. Roberts G., Taenzler F. An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement. Oxford Series in Electrical and Computer Engineering. – Oxford: Oxford University Press, 2011. – 438 p.
23. Koubaa Y. Recursive identification of induction motor parameters // Simulation modeling practice and theory. – 2004. – № 5. – P. 363–381.
24. Polishchuk V.I., Sergeev V.L. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic field sensor for turbogenerator diagnostics // Journal of Siberian Federal University – Mathematics and Physics. – 2015. – V. 8 (2). – P. 201–207.
25. Chang Shu. Differential Quadrature and its Application in Engineering: Engineering Application. – New York: Springer, 2000. – 340 p.
26. Burden R.L., Faires J.D. Numerical Analysis. 7th ed. – Boston: Brooks/Cole, 2000. – 837 p.
27. Parameter identification of induction motors using variable-weight cost function of genetic algorithms / A.C. Megherbi, H. Megherbi, K. Benmahamed et al. // Journal of electrical engineering and technology. – 2010. – V. 5. – № 4. – P. 597–605.
28. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proc. – Omsk, 2015. – P. 1–7.
29. Cohen J., Slissenko A. Implementation of timed abstract state machines with instantaneous actions by machines with delays. – Paris: University of Paris-12, 2008. – 65 p.
30. Hsing T., Eubank R. Theoretical Foundations of Functional Data Analysis, with an Introduction to Linear Operators. – Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd. Publ., 2015. – 384 p.

Поступила 15.12.2016 г.

Информация об авторах

Боловин Е.В., аспирант, ассистент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Глазырин А.С., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.313.333:62–83

METHOD FOR IDENTIFYING PARAMETERS OF SUBMERSIBLE INDUCTION MOTORS OF ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP UNITS FOR OIL PRODUCTION

Evgeniy V. Bolovin¹,
bolovinev@mail.ru

Alexander S. Glazyrin¹,
asglazyrin@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is caused by fact that 80 % of oil in the Russian Federation is extracted using electrical submersible pump units and this index is growing, but specific ratio of wells with electrical submersible pump in the general fund has not almost changed and it is about 34 %. It necessary to note that maintenance of optimal operation of the electrical drive, for example maximum volume of oil production at the lowest electrical power consumption, depends not only on the correct configuration of units and processing of external actions, but also it depends on self-tuning of adaptive control system, including the solution of the problems of identifying on-line the parameters of submersible induction motors.

The aim of the research is to design and test the method for online identification of the parameters of submersible induction motors based on the algebraic identification methods and discrete models.

Methods of research are based on using the systems of differential and difference equations, algebraic identification methods, construction of discrete mathematical models of submersible induction motors.

Results. The authors have designed the software system for monitoring the parameters of the submersible induction motors and tested this system by mathematical modeling. Using the designed software system for online monitoring the parameters of submersible induction motors is expedient. The perspective of using the designed system is in improving the intelligent control system of submersible centrifugal pump, that will result in increasing the exploitation efficiency, decreasing drive power consumption, accordingly reducing oil production cost, and increasing fault tolerance of the submersible induction motors due to online monitoring for motor parameters.

Key words:

Parameters identification, submersible induction motor, discrete model, intelligent control system, submersible centrifugal pump.

REFERENCES

1. Deloitte. *Oilfield services market conditions and trends 2016*. London, Deloitte & Touche Regional Consulting Services Limited, October 2016. 16 p.
2. Ivanovskiy V.N. Analis sovremennoyo sostoyaniya i perspektivy rasvitiya skvazhnykh nasosnykh ustanovok dlya dobychi nefiti [Analysis of the current state and perspectives of wellhead pumping units for oil production]. *Territoriya Neftegaz*, November, 2007, no. 11, pp. 36–47.
3. *Razrabotka mestorozhdeniya «Prirazlomnoe»* [Development of field «Prirazlomnoe»]. Available at: <http://shelf-neft.gazprom.ru/d/blockonthemainpage/04/4/prezentatsiya-proekta-prirazlomnoe.pdf> (accessed: 18 December 2016).
4. *Rossiyskiy rynek neftegazovykh uslug 2014. Analiticheskiy obzor* [Russian oil and gas industry market. Overview]. Ed. by E. Mirolyubova. Moscow, RBC Publ., 2014. 218 p.
5. Moiseeva E.V. Sostoyanie i perspektivy rasvitiya nefteservisnogo rynka Rossii 2014 [Current status and perspectives of Russian oil and gas industry market]. *Neftegazovaya Vertikal*, 2014, no. 22, pp. 64–72.
6. *OPEC Monthly Oil Market Report*. Vienna, Organization of the Petroleum Exporting Countries, November 2016. 106 p.
7. Lopatin R.R. *Modeli i algoritmy chastotno-reguliruemogo protsessu rasklinivaniya elektrosentrobezhnogo nasosa pri dobyche nefiti v oslozhnennykh usloviyakh*. Dis. Kand. nauk [Models and algorithms of variable frequency drive process of wedging electrical centrifugal pump for oil production in the complicated conditions. Cand. Diss.]. Tomsk, 2011. 140 p.
8. Deloitte. *Oilfield services market conditions and trends 2016*. London, Deloitte & Touche Regional Consulting Services Limited, June 2016. 16 p.
9. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A. Skvazhnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefiti – chto novogo? [Oil extraction wellhead pump – What's new?]. *Territoriya Neftegaz*, 2010, no. 10, pp. 14–22.
10. Ivanovskiy V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A. *Skvazhnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefiti* [Oil extraction wellhead pump]. Moscow, Neft i gaz Publ., 202. 824 p.
11. Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikiy S.N. *Novye tekhnologii i sovremennoye oborudovanie v elektroenergetike neftegazovoy promyshlennosti* [Modern technologies and equipment in electric power field of oil and gas industry]. Moscow, Ltd «Nedra-Biznest-sentr», 2007. 487 p.
12. Sipaylov V.A. *Optimizatsiya rezhimov raboty ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov mekhanizirovannoy dobychi nefiti*. Dis. Kand. nauk [Electrical submersible pump's mode setting optimization of mechanized production of oil. Cand. Diss.]. Tomsk, 2009. 196 p.
13. Hanzhin V.G. *Sposob ekspluatatsii malodebetnoy skvazhiny elektronasosom s chastotno-reguliruemym privodom* [Method of operating marginal wells by electric pump with variable frequency drive]. Patent RF, no. 2119578, 1997.
14. Melnichenko V.E. Uvelichenie effektivnosti mekhanizirovannoy dobychi nefiti [Recovery efficiency of mechanized oil production]. *Neftegazovaya Vertikal*, 2013, no. 11, pp. 62–66.
15. Khudyakov D.L., Markelov D.V. Intellektualnye stantsii upravleniya UETSN [Intelligent control station of electrical submersible pump units]. *Neftegazovaya Vertikal*, 2011, no. 11, pp. 64–68.
16. Makarov V.G. *Asinkhronnyy elektroprivod elektromekhanicheskikh sistem s optimalnymi rezhimami raboty po kriteriyu energosberezheniya*. Dis. Kand. nauk [Induction drive of electrical systems with optimal setting mode on energy savings. Cand. Diss.]. Tomsk, 2011. 162 p.

17. Antipin M.N. Resultaty vnedreniya tsiklicheskoj ekspluatatsii UETSN v OAO «Samotlorneftegaz» [Results of implantation of the electrical submersible cyclic operation pump units on JSC «Samotlorneftegaz»]. *Innovatsii i novye tehnologii v oblasti mekhanizirovannoy dobychi nefi*, 2011, no. 5, pp.74–81.
18. Kashirskikh V.G. *Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh dvigateley*. Dis. Doct. nauk [Dynamic identification of induction motor. Dr. Diss.]. Kemerovo, 2005. 133 p.
19. Ageev Sh.R., Berman A.V., Dzhalaev A.M., Drozdov A.N. Oborudovanie dlya dobychi nefi s vysokim sodержaniem svobodnogo gaza i opyt ego ekspluatatsii [Equipment for production of oil with high content of gas and exploitation experience]. *Tekhnika i tekhnologiya dobychi. Problemy i puti ikh resheniya*, 2005, no. 1, pp. 1–10.
20. Fedotov A.V., Khomchenko V.G., Zhiltsov V.V. *Modelirovanie privoda pogruzhnogo nasosa intellektualnoy skvazhiny* [Submersible pump drive of the intelligent wells modeling]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2012. 175 p.
21. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Document Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms. *7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*. Tomsk, 2012. Vol. 2, pp. 586–589.
22. Roberts G., Taenzler F. *An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement, Oxford Series in Electrical and Computer Engineering*. Oxford, Oxford University Press, 2011. 438 p.
23. Koubaa Y. Recursive identification of induction motor parameters. *Simulation modeling practice and theory*, 2004, no. 5, pp. 363–381.
24. Polishchuk V.I., Sergeev V.L. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic field sensor for turbogenerator diagnostics. *Journal of Siberian Federal University – Mathematics and Physics*, 2015, vol. 8 (2), pp. 201–207.
25. Chang Shu. *Differential Quadrature and its Application in Engineering: Engineering Application*. New York, Springer, 2000. 340 p.
26. Burden R.L., Faires J.D. *Numerical Analysis*. 7th ed. Boston, Brooks/Cole, 2000. 837 p.
27. Megherbi A.C., Megherbi H., Benmahamed K. Parameter identification of induction motors using variable-weight cost function of genetic algorithms. *Journal of electrical engineering and technology*, 2010, vol. 5, no. 4, pp. 597–605.
28. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings*. Omsk, 2015, pp. 1–7.
29. Cohem J., Slissenko A. *Implementation of timed abstract state machines with instantaneous actions by machines with delays*. Paris, University of Paris-12, 2008. 65 p.
30. Hsing T., Eubank R. *Theoretical Foundations of Functional Data Analysis, with an Introduction to Linear Operators*. Hoboken, John Wiley & Sons, Ltd. Published, 2015. 384 p.

Received: 15 December 2016.

Information about the authors

Evgeniy V. Bolovin, postgraduate, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Glazyrin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 30.01.2017. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 15,35. Уч.-изд. л. 13,87.
Заказ 25-17. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ