

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»



ISSN 2413-1830

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Инжиниринг георесурсов

Том 326, № 12, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
Инжиниринг георесурсов**

Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. 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 (Турция)
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 по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

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 № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 2413-1830

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

«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 геологических объектов.

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
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

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

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
National Research Tomsk Polytechnic University



ISSN 2413-1830

BULLETIN

OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Geo Assets Engineering

Volume 326, № 12, 2015

TPU  PUBLISHING

Tomsk

**BULLETIN
OF THE TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY.
Geo Assets Engineering**

Editorial Board

Dyachenko A.N., 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. (Turkey)
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, 2015

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 № 77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

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;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

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

- Схемы районирования Усть-Тымской мегавпадины по плотности ресурсов сланцевой нефти тогурской и баженовской материнских свит**
Исаев В.И., Лобова Г.А., Старостенко В.И., Фомин А.Н.
- Вид и структура дифференциальных уравнений движения и процесса уравнивания роторной машины с автобалансирами**
Гончаров В.В., Филимонихин Г.Б.
- Обоснование возможности уменьшения потерь в целиках за счет подпора твердеющими смесями**
Голик В.И., Лукьянов В.Г.
- Горение смеси метан-кислород в среде перегретого водяного пара атмосферного давления**
Прибатурин Н.А., Мильман О.О., Богомоллов А.Р., Шевырев С.А., Азиханов С.С.
- Оценка потенциальной пожароопасности осушенных болот Томской области**
Синюткина А.А., Бурнашова Е.Н., Беленко А.А., Гашкова Л.П., Малолетко А.А.
- Метод идентификации индикаторной кривой при интерпретации результатов газодинамических исследований скважин**
Нгуен Тхак Хоай Фьонг, Сергеев В.Л.
- Оценка численного моделирования процесса адаптации внутреннего отвалообразования к режиму действующих карьерных полей Кемеровской области**
Селюков А.В.
- Обнаружение частичных разрядов в машинах постоянного тока импульсным методом**
Стругов В.В., Лавринович В.А.
- Об одном подходе к кластеризации объектов**
Ботыгин И.А., Катаев С.Г., Тартаковский В.А., Шерстнева А.И.
- Оценка эколого-хозяйственного баланса Обь-Томского междуречья с учетом антропогенной нагрузки**
Панченко Е.М., Дюкарев А.Г.
- Численно-аналитическая модель транспортировки газа по линейному участку газопровода**
Данилушкин А.И., Данилушкин И.А.
- Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам**
Полищук Ю.М., Богданов А.Н.
- Опыт организации гидролого-климатических наблюдений на малых модельных водосборах Западной Сибири**
Копысов С.Г., Ярлыков Р.В.
- Применение современных систем автоматизации на открытых горных работах**
Аброськин А.С.
- Направление развития угольной промышленности в области недропользования и налогообложения, с целью стимулирования развития добычи метана в промышленных масштабах**
Шубина Е.А., Лукьянов В.Г.
- 6 Zonation schemes of Ust-Tym megadepression by density of shale oil resources of the togur and bazhenov source rock formations**
Isaev V.I., Lobova G.A., Starostenko V.I., Fomin A.N.
- 20 Form and structure of differential equations of motion and process of auto-balancing in the rotor machine with auto-balancers**
Goncharov V.V., Filimonikhin G.B.
- 31 Possibility justification of losses reduction in pillars by backwatering with hardening mixtures**
Golik V.I., Lukyanov V.G.
- 39 Burning of methane-oxygen mixture in the environment of overheated steam of atmospheric pressure**
Pribaturin N.A., Milman O.O., Bogomolov A.R., Shevirev S.A., Azikhanov S.S.
- 45 Assessment of potential fire risk of Tomsk region mires**
Sinyutkina A.A., Burnashova E.N., Belenko A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A.
- 54 Identification method of indicator diagram by interpreting the measured results of gas-dynamic well testing**
Nguyen, P.T.H. Sergeev V.L.
- 60 Evaluation of numerical simulation of the process of adapting internal dumping mode to the existing mining fields of the kemerovo region**
Selyukov A.V.
- 72 Detection of partial discharge in dc motors by pulse method**
Strugov V.V., Lavrinovich V.A.
- 78 An approach to clustering objects**
Botygin I.A., Kataev S.G., Tartakovskiy V.A., Sherstneva A.I.
- 87 Assessment of ecological and economical balance of the territory of Ob-Tom interfluve considering anthropogenic load**
Panchenko E.M., Dyukarev A.G.
- 96 Numerical analytical model of gas transport on the gas-main pipeline**
Danilushkin A.I., Danilushkin I.A.
- 104 Active thermokarst zones on permafrost territory and their detecting on space images**
Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N.
- 115 Experience in organization of hydrological and climatic observations at small model catchments of West Siberia**
Kopysov S.G., Yarlykov R.V.
- 122 The use of modern systems of automation of open cast mining**
Abroskin A.S.
- 131 Trends in coal mining laws and taxation aimed at stimulating commercial coal seam methane production**
Shubina E.A., Lukyanov V.G.

УДК 553.98:551.763:550.836

СХЕМЫ РАЙОНИРОВАНИЯ УСТЬ-ТЫМСКОЙ МЕГАВПАДИНЫ ПО ПЛОТНОСТИ РЕСУРСОВ СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ ТОГУРСКОЙ И БАЖЕНОВСКОЙ МАТЕРИНСКИХ СВИТ

Исаев Валерий Иванович,

докт. геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: isaewi@tpu.ru

Лобова Галина Анатольевна,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: lobovaga@tpu.ru

Старостенко Виталий Иванович,

докт. физ.-мат. наук, профессор, академик НАН Украины, директор Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Украина, 03142, г. Киев, пр. Палладина, 32. E-mail: vstar@igph.kiev.ua

Фомин Александр Николаевич,

докт. геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.
E-mail: fominan@ipgg.sbras.ru

Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработки критериев и схем оценки трудноизвлекаемых запасов сланцевой нефти (аккумулированной *in situ*) материнских формаций для воспроизводства и расширения ресурсной базы углеводородного сырья Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Цель исследований. Определить комплекс исходных геолого-геофизических данных, методику и технологию регионально-зонального районирования нефтематеринских отложений по плотности ресурсов сланцевой нефти, выполнить районирование Усть-Тымской мегавпадины.

Объект исследований. Нижнеюрские тогурские и верхнеюрские баженовские нефтематеринские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытого глубокими скважинами на юго-востоке Западной Сибири.

Методика исследований. Принято, что основные объемы сланцевой нефти локализируются там, где материнские отложения находятся/находились в главной зоне нефтеобразования и в большей степени прогреты. Методика районирования базируется на методе палеотемпературного моделирования, позволяющего реконструировать термическую историю материнских отложений, выделить по геотемпературному критерию и закартировать очаги генерации нефтей. Оценка ресурсов генерированных нефтей определяется интегральным показателем, напрямую зависящим от времени нахождения материнской свиты в главной зоне нефтеобразования и от ее геотемператур.

Результаты исследований. Продемонстрированы исходные геолого-геофизические данные, методический подход, схема и результаты впервые выполненного районирования тогурской и баженовской свит Усть-Тымской мегавпадины по плотности ресурсов сланцевой нефти. Перспективными землями на сланцевую нефть баженовской свиты являются зона тройного сочленения Сампатского мезопргиба, Парабельского мегавыступа и Северо-Парабельской мегамоноклинали и зона тройного сочленения Неготского мезопргиба, Александровского свода и Караминской мезоседловины. Перспективные земли на сланцевую тогурскую нефть проявляются в зоне сочленения центральной и юго-западной частей Усть-Тымской мегавпадины с Северо-Парабельской мегамоноклиной. Достоверность районирования аргументируется притоками нефти при гидроразрыве пласта Ю₆ на Снежном месторождении и результатами бурения параметрической скважины Восточно-Пайдугинская № 1.

Ключевые слова:

Сланцевая нефть, баженовская и тогурская свиты, главная зона нефтеобразования, палеотемпературное моделирование, районирование Усть-Тымской мегавпадины.

Введение

Оценки ресурсного потенциала сланцевого газа Северной Евразии, выполненные учеными и специалистами СНГ, неоднозначны [1, 2]. Оценки ресурсов сланцевой нефти (аккумулированной *in situ* материнской породой) вполне оптимистичные, но степень разработанности этой проблемы в России применительно к практическому использованию результатов невысока [3].

По оценкам западных специалистов ресурсы России по сланцевой нефти в нефтематеринских свитах («shale oil») составляют 248 млрд барр. н. э. [4]. По подсчетам ресурсов технически извлекаемой нефти, выполненным О.М. Прищепой, получены примерно те же ресурсы – 46 млрд т, в том числе по отложениям баженовской свиты Западной Сибири – 26 млрд т [5]. Но нефтематеринские формации до последнего времени, за исключением

баженовской свиты Западной Сибири, не выступали в качестве объекта поисковых работ.

На сегодняшний день на юго-востоке Западной Сибири две нефтедобывающие компании Томской области, получившие притоки нефти из пласта Ю₀, поставили на государственный баланс запасы нефти по баженовской свите (категория С₁). Это ООО «Томская нефть» (ранее ГП «Томскнефтегазгеология») – 1987 г., Федюшкинское нефтяное месторождение, Нюрольская мегавпадина, и ООО «Норд Империл» – 2014 г., Снежное нефтегазоконденсатное месторождение, Усть-Тымская мегавпадина.

Системный подход к резервуарам сланцевой нефти как к нефтегазоперспективным объектам находится в стадии разработки. Здесь комплекс проблем, включая прогнозное районирование нефтематеринской формации с точки зрения ранжирования зон и площадей по степени перспективности. При этом существует дефицит информации об аккумуляционной доле в самой нефтематеринской свите генерированных углеводородов (УВ) [6]. Вопрос о доле аккумулятированных *in situ* УВ не решен и в применяемых системах бассейнового моделирования [7–9]. Однако следует отметить, что по ре-

зультатам выполненных пиролитических исследований и расчетам специалистов «ТатНИПИнефть» более 2/3 объема генерированных УВ может оставаться в матрице генерирующей толщи [10].

Вместе с тем ключевым фактором, детализирующим характеристику сланцевой формации, являются время действия и температурный режим *главной фазы нефтеобразования* (ГФН) [11, 12], *нефтяного окна* [13, 14]. Говоря на языке поисков, основные объемы аккумулятированной нефти локализируются там, где материнские отложения находились в *главной зоне нефтеобразования* (ГЗН) [15, 16] и в большей степени прогреты.

Цель настоящего сообщения – продемонстрировать исходные данные, схему и результаты первого районирования баженовской (*bgJ₃tt*) и тогурской (*tgJ₁t₁*) свит Усть-Тымской мегавпадины (рис. 1) по плотности ресурсов сланцевой (аккумулятированной *in situ*) нефти. Методика районирования базируется на методе палеотемпературного моделирования, который органически вписывается в методологию учения о ГФН и пороговых температурах вхождения материнских отложений в ГЗН.

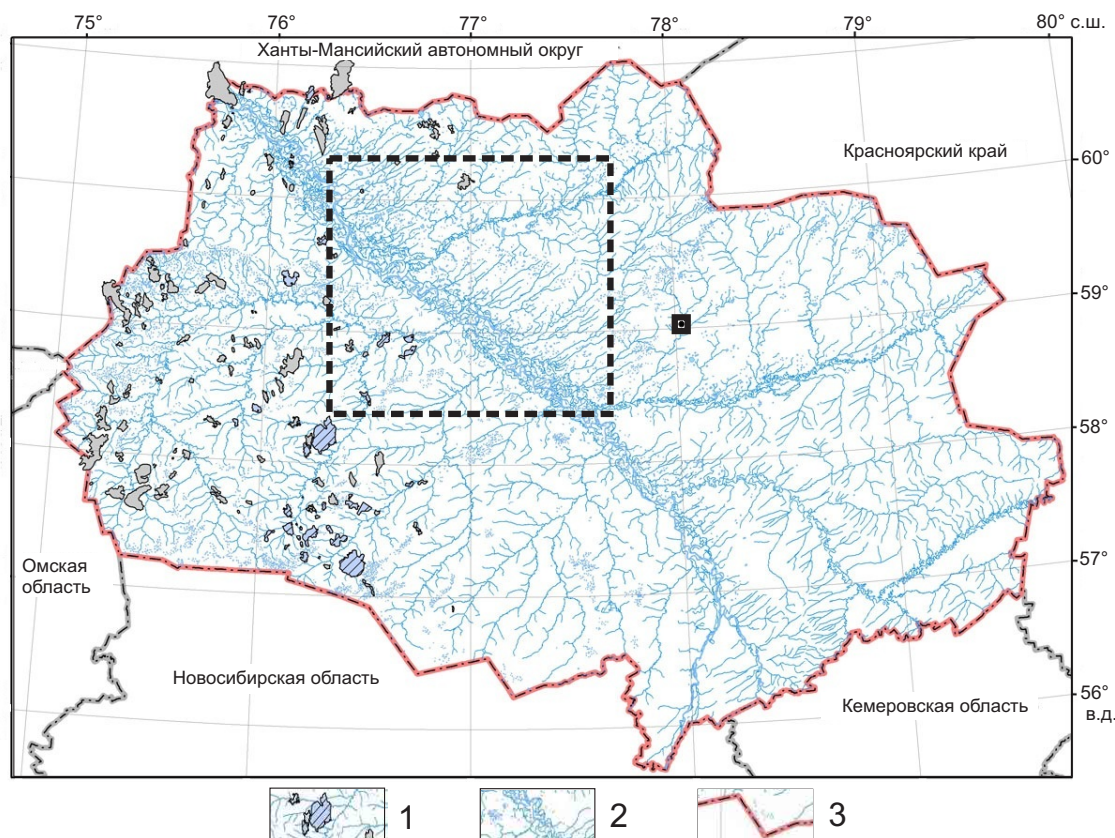


Рис. 1. Положение территорий исследований (контур пунктирной линией) и положение скважины Восточно-Пайдугинская № 1 параметрическая на схематической карте размещения месторождений углеводородов Томской области: 1 – месторождения УВ; 2 – бассейн р. Оби; 3 – административная граница Томской области

Fig. 1. Position of research territories (the contour is highlighted with a dashed line) and position of the East Payduginskaya well № 1 parametrical on a schematic map of distribution of hydrocarbon fields of the Tomsk region: 1 – hydrocarbon deposits; 2 – basin of the Ob River; 3 – administrative border of the Tomsk region

О методике районирования

Восстановление термической истории материнских отложений выполнено на основе палеотектонических и палеотемпературных реконструкций. Применен метод палеотемпературного моделирования [17–19], основанный на численном решении уравнения теплопроводности твердого тела с подвижной верхней границей. Метод позволяет на *первом этапе* по распределению «наблюденных» температур в скважине рассчитать тепловой поток через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решить обратную задачу геотермии. На *втором этапе*, с известным значением теплового потока, решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются геотемпературы в заданных точках осадочной толщи (включая отложения материнских свит) в заданные моменты геологического времени.

Далее для отложений материнской свиты рассчитывается интегральный показатель плотности ресурсов генерированных нефтей (R , усл. ед.) по формуле [20, 21]:

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

где U_i – расчетная геотемпература очага генерации нефти (ГЗН), °C; 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 вышеприведенной формулы, расчетное значение плотности генерированных ресурсов (на участке скважины) напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН.

Применяемый подход оценки ресурсов УВ позволяет кумулятивно учитывать динамику геотемператур материнских отложений. Вместе с тем известно, что генерация УВ происходит тогда, когда текущее значение свободной энергии превышает значение энергии активации – прочность связи керогена. А последнее обеспечивается в первую очередь за счет прироста температуры [22–24]. Такой подход к оценке плотности генерированных ресурсов позволяет достаточно просто определить пространственно-временную локализацию очагов генерации УВ. Оценка плотности ресурсов выполняется в условных (относительных) единицах, что представляется корректным для последующего площадного районирования.

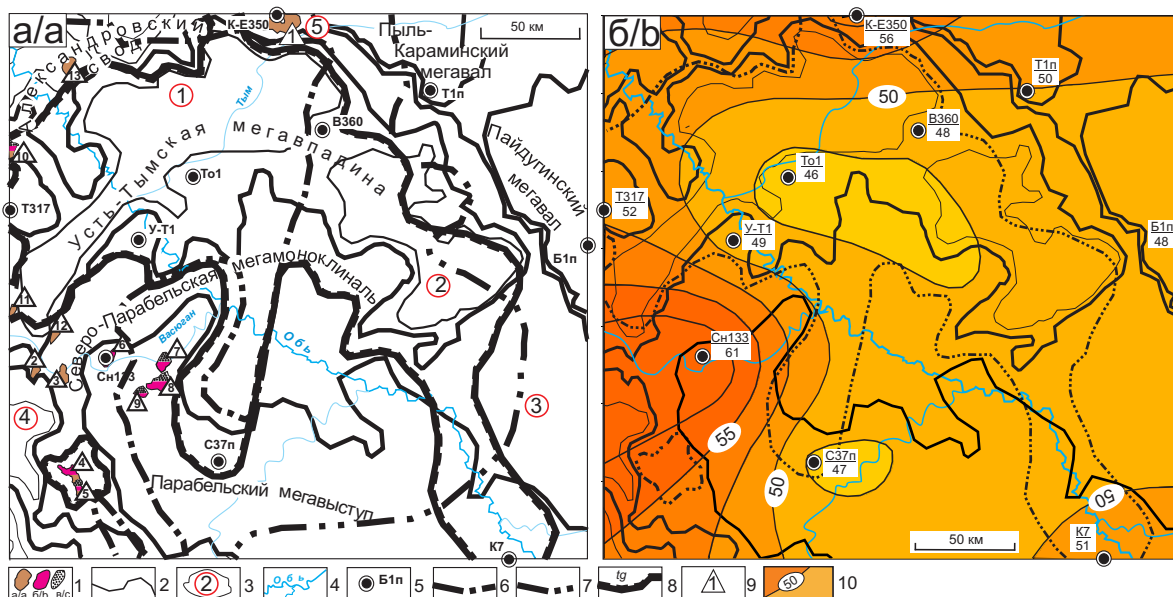


Рис. 2. Схемы нефтегазоносности Усть-Тымской мегавпадины и структур ее обрамления на тектонической основе [25] (а) и распределения значений плотности теплового потока из основания осадочного разреза (б): 1 – месторождения: а) нефтяное, б) газоконденсатное, в) газовое; границы тектонических элементов: 2 – I порядка, 3 – II порядка, и условный номер структуры; 4 – речная сеть; 5 – исследуемая представительная скважина и ее условный номер; 6 – граница распространения баженовской свиты и отложений «переходной зоны»; 7 – граница распространения отложений «переходной зоны» и марьяновской свиты; 8 – граница распространения тогурских отложений; 9 – условный номер месторождения (6 – Снежное); 10 – изолинии значений расчетной плотности теплового потока, мВт/м². Структуры II порядка: 1 – Неготский мезопрогиб; 2 – Пыжинский мезопрогиб; 3 – Зайкинский мезоседловина; 4 – Сампатский мезопрогиб; 5 – Караминская мезоседловина

Fig. 2. Schemes of oil and gas content of Ust-Tym megadepression and of the structures of its frame on the tectonic basis [25] (a) and the distribution of heat flow density values from the sedimentary section base (b): 1 – fields: a) oil, b) gas and condensate, c) gas; the boundaries of tectonic elements: 2 – I order, 3 – II order and a conditional number of the structure; 4 – river network; 5 – representative well of interest and its conditional number; 6 – boundary of the Bazhenov formation and sediments of a «transition zone»; 7 – boundary of «transition zone» deposits and Maryanovsk suite; 8 – boundary of Togur deposits; 9 – conditional number of the field (6 – Snezhnoe); 10 – contour of ?? heat flow density values, mW/m²; II order structures: 1 – Negotsky mesotrough, 2 – Pyzhinsky mesotrough, 3 – Zaikinsky mesosaddle, 4 – Sampatsky mesotrough, 5 – Karaminsky mesosaddle

Общая характеристика нефтегазоносности и теплового поля Усть-Тымской мегавпадины

В Усть-Тымском нефтегазоносном районе выделяются следующие нефтегазоносные комплексы (НГК): палеозойский с нефтегазоносным горизонтом зоны контакта, нижнеюрский (геттанг-раннеюрский, позднеюрский-ааленский), среднеюрский (байос-батский), верхнеюрский (келловей-волжский) и меловой (неокомский). Залежи УВ в основном связаны с доюрским (палеозойским), среднеюрским, верхнеюрским и меловым комплексами (рис. 2, а, табл. 1).

Основной нефтегенерирующей толщей для нижнеюрского и доюрского НГК является нижнеюрская тогурская свита с рассеянным органическим

веществом (РОВ) гумусово-сапропелевого типа [26]. Толщина тогурской свиты достигает 50 м, концентрация $C_{орг}$ – до 5 %, катагенетическая преобразованность РОВ находится на уровне градации $МК_1^1$ – $МК_2$, что определяет региональный генерационный потенциал свиты. Тогурская свита картируется [25] в центральных и восточных частях мегавпадины, а также заливообразно – в северной и юго-восточной части Парабельского мегавыступа и озерообразно – в южной части Северо-Парабельской мегамоноклинали (рис. 2, а).

Верхнеюрской нефтематеринской свитой в западной части территории выступает *баженовская свита*, на востоке ее временной аналог – *марьяновская*. Между границами распространения этих свит выде-

Таблица 1. Характеристика месторождений УВ в пределах Усть-Тымской мегавпадины и структур ее обрамления
Table 1. Characteristics of hydrocarbon deposits within the Ust-Tym megadepression and the structure of its frame

Месторождение Deposit	Условный номер (на рис. 2А) Conventional number (fig. 2a)	НГК Oil and gas bearing complex	Фазовое состояние Phase state	Горизонт (пласт) Horizon (bed)
Киев-Еганское Kiev-Eganskoe	1	Меловой Cretaceous	Нефть/Oil	Б ₁₂ , Б ₁₀
		Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть/Oil	Ю ₁
Ясное Yasnoe	2	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть/Oil	Ю ₁ ⁴
		Доюрский Pre-Jurassic	Нефть/Oil	НГГЗК (М) Oil-and-gas bearing horizon of contact surface
Двойное Dvoynoe	3	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть/Oil	Ю ₁ ¹⁻²
Гурагинское Guraginskoe	4	Меловой Cretaceous	Нефть, газоконденсат Oil, gas condensate	Б ₁₂ , Б ₁₀
Соболиное Sobolinoe	5	Меловой Cretaceous	Нефть, газ Oil, gas	А ₁₂ , Б ₁₂ , Б ₁₀
		Верхнеюрский Upper-Jurassic	Газоконденсат Gas condensate	Ю ₁ ³⁻⁴
Снежное Snezhnoe	6	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть, газоконденсат Oil, gas condensate	Ю₀ Ю ₁ ³⁻⁴ Ю ₁ ¹⁻²
Северо-Сильгинское Severo-Silginskoe	7	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Газ свободный, конденсат Free gas, condensate	Ю ₁
Усть-Сильгинское Ust-Silginskoe	8	Верхнеюрский+ Среднеюрский Upper-Jurassic+ Middle-Jurassic	Газ свободный, конденсат Free gas, condensate	Ю ₁ +Ю ₂
Средне-Сильгинское Middle-Silginskoe	9	Верхнеюрский+Среднеюрский Upper-Jurassic+Middle-Jurassic	Газ свободный, конденсат Free gas, condensate	Ю ₁ +Ю ₂
Чкаловское Chkalovskoe	10	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть разгазированная Oil with gas	Ю ₁ ¹
		Доюрский Pre-Jurassic	Газ, конденсат, нефть Gas, condensate, oil	НГГЗК (М) Oil-and-gas bearing horizon of contact surface
			Нефть/Oil	PZ
Головное Golovnoe	11	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть/Oil	Ю ₁
Никольское Nikolskoe	12	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть/Oil	Ю ₁
Бурановское Buranovskoe	13	Верхнеюрский Upper-Jurassic	Нефть/Oil	Ю ₁

ляется зона с переходными условиями седиментации и катагенеза. По генезису РОВ верхнеюрские нефтепроизводящие породы в пределах впадины имеют зональное строение [25]. Значения $C_{орг}$ варьируют от 9–12 % в зоне распространения баженовской свиты в западной части мегавпадины (сапропелевое РОВ), постепенно уменьшаясь до 6–8 % в переходной зоне (РОВ смешанного типа), и достигают значений 2–3 % в породах марьяновской свиты в восточной части депрессии («псевдогумусовое» РОВ). Эти отложения являются основной нефтегенерирующей толщей для мелового и верхнеюрского НГК.

На рис. 2, б приведена схема распределения расчетных значений *плотности теплового потока из основания осадочного чехла*. Карта построена путем интерполяции значений теплового потока, полученного решением обратной задачи геотермии в моделях распространения тепла 10-ти *представительных* глубоких скважин. В качестве «наблюденных» использованы пластовые температуры, замеренные при испытании скважин (табл. 2), и палеотемпературы, определенные из ОСВ (табл. 3). *Представительные* глубокие скважины выби-
рались по следующим критериям:

Таблица 2. Пластовые температуры, измеренные при испытании глубоких скважин Усть-Тымской мегавпадины

Table 2. Formation temperatures measured during the test of deep wells of Ust-Tym megadepression

Скважина Well	Условный номер скважины (на рис. 2) Conventional number (fig. 2)	Интервал (глубина), м Interval (depth), m	Отложения (свита) Deposits (suite)	Пласт, горизонт Layer (horizon)	Приток, м ³ /сут Influx, m ³ /day	Тип флюида Fluid type	Температура пластовая, °C Reservoir temperature, °C
Береговая № 1 параметрическая Beregovaya № 1 parametric	Б1п	2420–2409	Тюменская Tyumenskaya	Ю ₂	6,9	Вода/Water	83
		2335–2325	Васюганская Vasyuganskaya	Ю ₁	14,6	Вода/Water	78
Трассовая № 317 Trassovaya № 317	Т317	2565–2569	Васюганская Vasyuganskaya	Ю ₁	2,26	Вода+Нефть Water+Oil	92
Сенькинская № 37 параметрическая Senkinskaya № 37 parametric	С37п	2764–2776	Тюменская Tyumenskaya	Ю ₄	1,1	Вода/Water	95
		2629–2644	Васюганская Vasyuganskaya	Ю ₁	5,0	Вода/Water	88
		2275–2285 2292–2315	Тарская Tarskaya	–	100	Вода/Water	78
Толпаровская № 1 Tolparovskaya № 1	То1	2631–2639	Васюганская Vasyuganskaya	Ю ₁	4,11	Вода/Water	97
Тымская № 1 параметрическая Tymskaya № 1 parametric	Т1п	2920–2911 2905–2900	Тюменская Tyumenskaya	–	0,72	Вода/Water	100
		2690–2680	Тюменская Tyumenskaya	–	1,6	Вода/Water	89
Колпашевская № 7 Kolpashevskaya № 7	К7	2305–2318 2304–2312 2298–2308	Наунакская Naunakskaya	–	1,15	Вода+пленка нефти Water+Oil film	80
Вертолетная № 360 Vertoletnaya № 360	В360	2620–2609	Васюганская Vasyuganskaya	Ю ₁	4,38	Вода/Water	85
		2605–2588	Васюганская Vasyuganskaya	Ю ₁	6,38	Вода/Water	84
Усть-Тымская № 1 Ust-Tymskaya № 1	У-Т1	2890–2873 2859–2835	Тюменская Tyumenskaya	Ю ₆	1,52	Вода/Water	107
		2763–2777	Тюменская Tyumenskaya	Ю ₆	4,9	Вода/Water	96
		2685–2701	Тюменская Tyumenskaya	Ю ₅	8,1	Вода/Water	90
		2538–2550	Тюменская Tyumenskaya	Ю ₂	9,8	Вода/Water	82
Снежная № 133 Snezhnaya № 133	Сн133	2623–2642	Палеозой Paleozoic		0,5	Вода/Water	119
		2419–2433	Наунакская Naunakskaya	Ю ₁	0,24	Нефть/Oil	102
		2395–2404	Наунакская Naunakskaya	Ю ₁	800	Газ/Gas	95

Примечание. Данные испытаний глубоких скважин изучены и сведены из первичных «дел скважин», отчетов по подсчету запасов, отчетов оперативного анализа и обобщения геолого-геофизических материалов по Томской области (материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО»).

Note. The data of deep wells testing are studied and linked from the «well file», reserves assessment reports, reports of operational analysis and generalization of geology and geophysical evidence in Tomsk region (materials of Tomsk branch of «Territorial fund of geological information in SFD»).

- 1) наличие ощутимых притоков флюида при испытании пластов, что повышает достоверность пластовых температур, используемых в качестве «наблюденных» для палеотемпературного моделирования;
- 2) наличие определений максимальных геотемператур по ОСВ, используемых в качестве «наблюденных», что существенно повышает достоверность результатов палеотемпературного моделирования;
- 3) достаточно равномерное распределение скважин по территории исследования, что является важным условием корректности последующей

интерполяции при построении прогнозных карт.

Реконструкции термической истории тогурской свиты и районирование по плотности ресурсов сланцевой нефти

На следующем этапе исследований на 10 ключевых моментов геологического времени (на моменты начала и завершения формирования свит) в моделях восстановлена термическая история тогурских отложений. На эти времена, путем интерполяции геотемператур в разрезах скважин, построены схематические карты распределения гео-

Таблица 3. Палеотемпературы, определенные по ОСВ (R_{vit}^o) керн глубоких скважин Усть-Тымской мегавпадины

Table 3. Paleotemperatures defined according to the vitrinite reflectance (R_{vit}^o) of cores of deep wells of Ust-Tym megadepression

Скважина Well	Условный номер скважины (на рис. 2) Conventional number (fig. 2)	Глубина определения (гипсометрическая привязка), м Depth determination (hypsometric tying), m	Отложения, свита Deposits, suite	R_{vit}^o , %	Палеотемпература (°C) по R_{vit}^o Paleotemperature (°C) on R_{vit}^o
Береговая № 1 параметрическая Beregovaya № 1 parametric	Б1п	2351	Васюганска Vasyuganskaya	0,52	83
		2390	Васюганская Vasyuganskaya	0,64	98
		2405	Тюменская Tyumenskaya	0,64	98
		2410	Тюменская Tyumenskaya	0,64	98
		2449	Тюменская Tyumenskaya	0,64	98
		2460	Тюменская Tyumenskaya	0,59	93
		2542	Тюменская Tyumenskaya	0,61	95
		2560	Тюменская Tyumenskaya	0,67	103
		2570	Тюменская Tyumenskaya	0,62	97
		2573	Тюменская Tyumenskaya	0,65	100
Киев-Еганская № 350 Kiev-Eganskaya № 350	К-Е350	2610	Баженовская Bazhenovskaya	0,72	109
		2690	Васюганская Vasyuganskaya	0,81	121
Сенькинская № 37 параметрическая Senkinskaya № 37 parametric	С37п	2895	Тюменская Tyumenskaya	0,67	103
		3013	Тюменская Tyumenskaya	0,67	103
Толпаровская № 1 Tolparovskaya № 1	Тo1	2590	Куломзинская Kulomzinskaya	0,64	99
		3217	Тюменская Tyumenskaya	0,73	111
Колпашевская № 7 Kolpashevskaya № 7	К7	2375	Наунакская Naunakskaya	0,62	96
		2705	Тюменская Tyumenskaya	0,62	96
Вертолетная № 360 Vertoletnaya № 360	В360	2622	Наунакская Naunakskaya	0,69	105
		2656	Тюменская Tyumenskaya	0,69	105

Примечание. ОСВ определены в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск).

Note. VR is determined in the Laboratory of oil and gas geochemistry at the Institute of oil-and-gas geology and geophysics SB RAS (Novosibirsk).

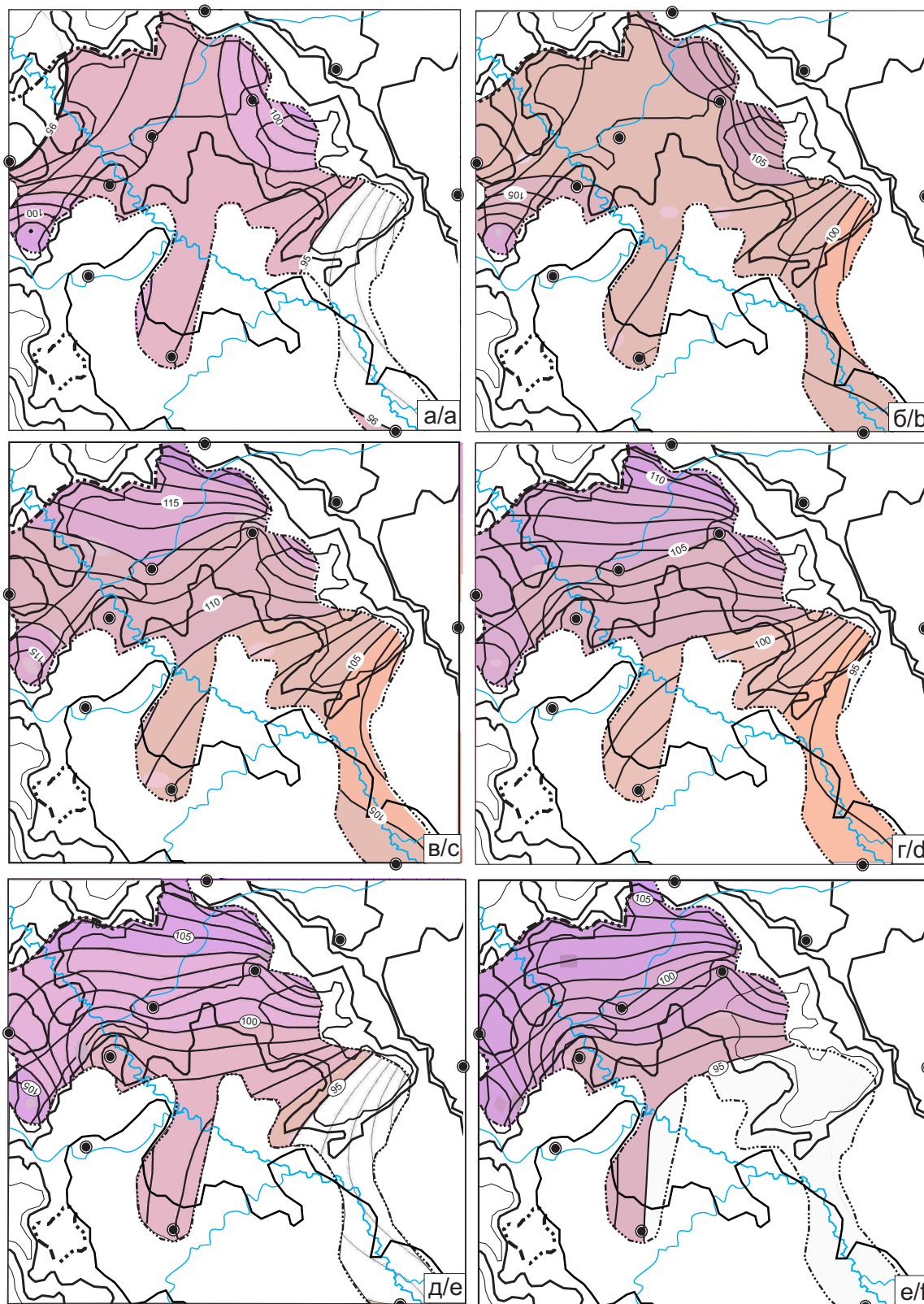


Рис. 3. Схематические карты распределения геотемператур (значения изолиний в °С) и положения очагов генерации тогурских нефтей Усть-Тымской мегавпадины (с использованием [28]): 86,5 (а); 61,7 (б); 37,6 (в); 32,3 (г); 1,64 (д) млн лет назад, в современном разрезе (е). Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2

Fig. 3. Schematic maps of the geotemperatures distribution (isolines values, °C) and the position of the centers of generation of togur oils of Ust-Tym megadepression (using [28]): 86.5 (a); 61.7 (b); 37.6 (c); 32.3 (d); 1.64 (e) a million years ago, in the modern section (f). The rest of the symbols are the same as in Fig. 2

температур. По геотемпературному критерию [27] выделены палеоочаги интенсивной генерации тогурских нефтей (рис. 3). Принято, что пороговые температуры, определяющие границу очага генерации нефти породами тогурской свиты (гумусовое РОВ), – 95 °С.

91,6 млн лет назад (конец формирования покурской свиты) очаги интенсивной генерации нефти в тогурской свите еще не «работали». Максимальная геотемпература в пределах зоны распространения пород тогурской свиты не превышала 92 °С. 86,5 млн лет назад (конец формирования ипатовской свиты) очаги при температурах от 95 до 100 °С были практически повсеместно распространены, за исключением Северо-Парабельской моноклинали и Парабельского мегавыступа (рис. 3, а). 73,2 млн лет назад (конец формирования славгородской свиты) очаги при температурах от 95 до 105 °С действовали в пределах всей зоны распространения пород тогурской свиты. 61,7 млн лет назад (конец формирования ганькинской свиты) – температуры очагов от 95 до 110 °С (рис. 3, б). 41,7 млн лет назад (конец формирования люлинворской свиты) очаги генерации действовали при температурах от 95 °С, превышая 115 °С.

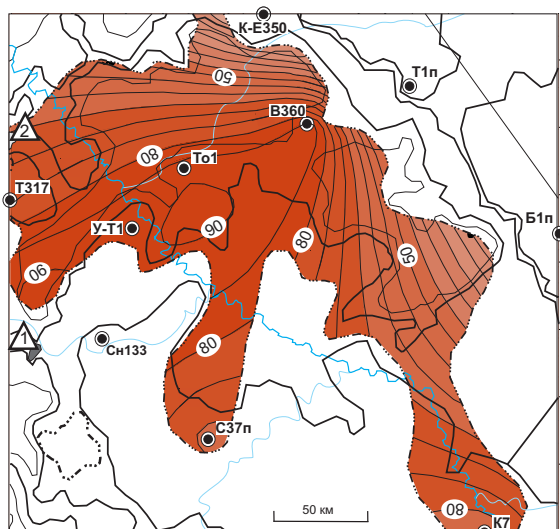


Рис. 4. Схема распределения относительной плотности ресурсов генерированных тогурских нефтей в Усть-Тымской мегавпадине. Значения изолиний – в величине интегрального показателя R , усл. ед. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2

Fig. 4. The scheme of distribution of the relative density of the resources of generated togur oils in Ust-Tym megadepression. The values of isolines – in the value of the integral index of R , cond. u. The rest of the symbols are the same as in Fig. 2

37,6 млн лет назад (время максимального прогрева осадочной толщи) – температуры очагов от 95 °С, достигая 120 °С (рис. 3, в). 32,3 млн лет назад (конец формирования чеганской свиты) очаги действовали при температурах от 95 до 110 °С (рис. 3, г). 4,71 млн лет назад (конец миоценового времени) очаги работали при температурах от

95 до 110 °С, из зоны очагов вышел участок Северо-Парабельской моноклинали. 1,64 млн лет назад (конец плиоценового времени) из зоны очагов с геотемпературами от 95 до немногим больше 105 °С выходит участок и Парабельского мегавыступа (рис. 3, д).

Очаги интенсивной генерации тогурских нефтей продолжают действовать в современном разрезе при температурах от 95 до 105 °С, но лишь в центральной и северо-западной части мегавпадины (рис. 3, е).

На рис. 4 приведена схема распределения относительной плотности ресурсов генерированных тогурских нефтей, построенная путем интерполяции значений показателя R для разрезов 6-ти представительных скважин, пробуренных в области распространения тогурской свиты. По схеме видно, что перспективными землями Усть-Тымской мегавпадины на сланцевую тогурскую нефть является практически вся область распространения тогурской свиты. Несколько более перспективна зона сочленения центральной и юго-западной частей мегавпадины с Северо-Парабельской мегамоноклиной.

Реконструкции термической истории баженовской свиты и районирование по плотности ресурсов сланцевой нефти

Далее, в моделях восстановлена термическая история баженовских отложений и ее аналогов на моменты начала и завершения формирования свит. На эти времена, путем интерполяции геотемператур в разрезах 10-ти скважин, построены схематические карты распределения геотемператур. По геотемпературному критерию выделены палеоочаги интенсивной генерации баженовской нефти (рис. 5). Принято, что пороговые температуры, определяющие границу очага генерации нефти (ГЗН), следующие: для породы баженовской свиты – 85 °С; для породы переходной зоны – 90 °С; для породы марьяновской свиты – 95 °С.

91,6 млн лет назад генерация нефти в баженовской свите еще не наблюдалась. 86,5 млн лет назад (рис. 5, а) очаг действовал в зоне распространения баженовской свиты при температурах 85–95 °С, в переходной зоне – 90–95 °С, в зоне распространения марьяновской свиты – при температурах несколько больше 95 °С. 73,2 млн лет назад очаг действовал в баженовской свите при температурах 85–95 °С и занимал практически всю зону распространения свиты, в переходной зоне – при температурах 90–100 °С, в марьяновской свите – при температурах 95–100 °С.

61,7 млн лет назад (рис. 5, б) в баженовской свите очаг действовал при температурах 85–105 °С во всей зоне её распространения, в переходной зоне очаг действовал при температурах 90–105 °С, в марьяновской свите – при температурах 95–110 °С. 41,7 млн лет назад очаг в баженовской свите действовал при температурах 85–110 °С, в переходной зоне – при 90–115 °С, в марьяновской свите – при температурах 95–115 °С.

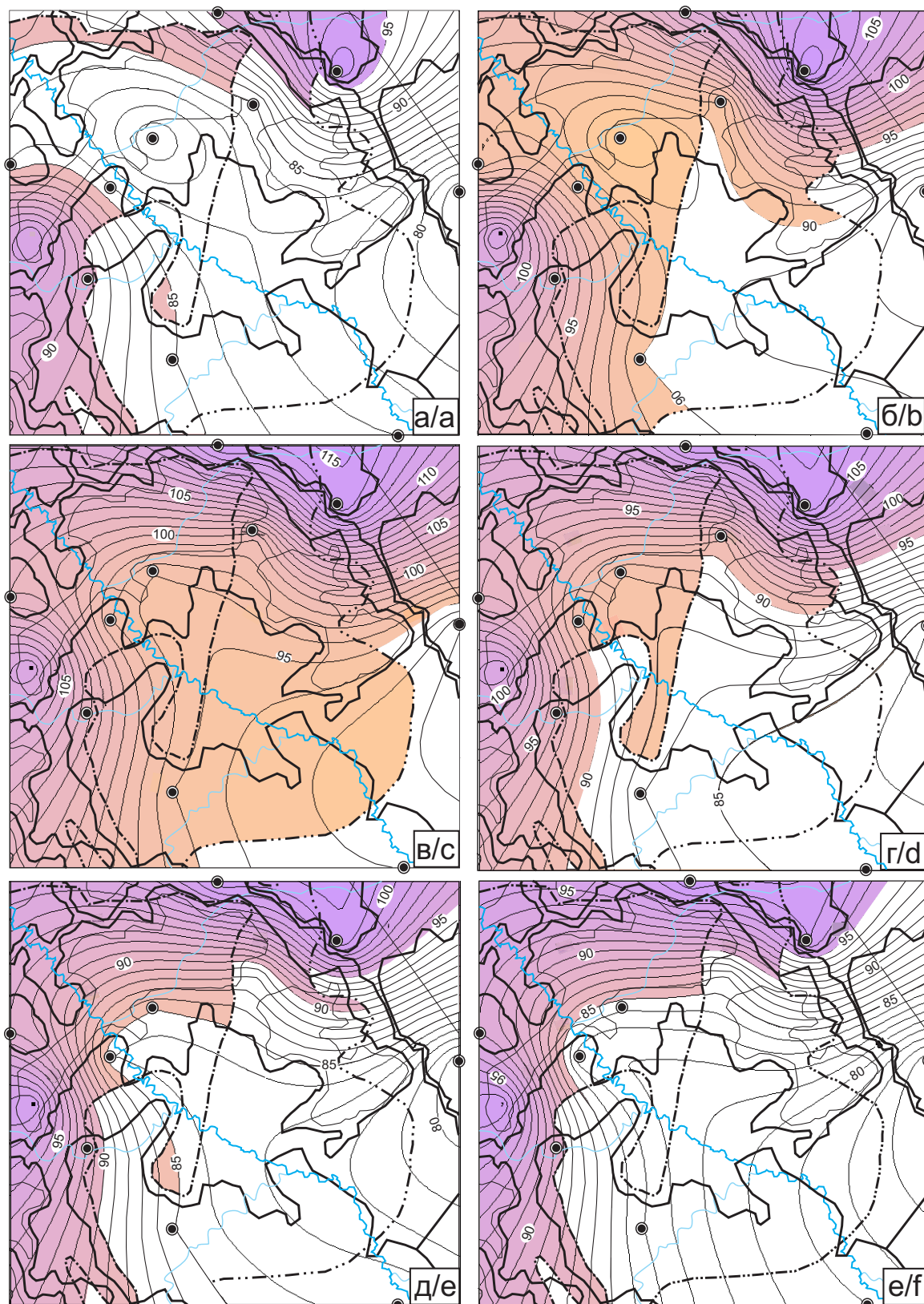


Рис. 5. Схематические карты распределения геотемператур (значения изолиний в °С) и положения очагов генерации баженовских нефтей Усть-Тымской мегавпадины (с использованием [29]): 86,5 (а); 61,7 (б); 37,6 (в); 32,3 (г); 1,64 (д) млн лет назад и в современном разрезе (е). Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2

Fig. 5. Schematic maps of the geotemperatures distribution (isolines values, °C) and the position of the centers of generation of bazhenov oils of Ust-Tym megadepression (using [29]): 86.5 (a), 61.7 (b), 37.6 (c), 32.3 (d), 1.64 (e), a million years ago and modern section (f). The rest of the symbols are the same as in Fig. 2

37,6 млн лет назад, во время максимального прогресса осадочной толщи (рис. 5, в), очаг в баженовской свите действовал при температурах 85–110 °С. В переходной зоне очаг действовал на всей ее площади при температурах 90–115 °С. В марьяновской свите – при температурах 95–115 °С. 32,3 млн лет назад (рис. 5, г) очаг в баженовской свите действовал во всей зоне ее распространения при температурах 85–100 °С. В переходной зоне – при температурах 90–105 °С, постепенно уменьшаясь. В марьяновской свите очаг действовал при температурах 95–105 °С, из зоны очага вышла центральная часть Пайдугинского мегавала. 4,71 млн лет назад очаг в баженовской свите действовал при температурах 85–100 °С, в переходной зоне – при 90–105 °С, в марьяновской свите – при температурах 95–105 °С. 1,64 млн лет назад (рис. 5, д) очаг в баженовской свите действовал при температурах 85–100 °С, из зоны очага вышел участок Парабельской мегамоноклинали. В переходной зоне очаг действовал при температурах 90–100 °С, в марьяновской свите – при 95–100 °С.

Очаг интенсивной генерации нефти в *современном разрезе* баженовской свиты (рис. 5, е) действует при температурах 85–95 °С, занимая западную и северную части зоны распространения свиты. В переходной зоне очаг действует при температурах 90–100 °С и локализуется севернее Вертолетной площади. В марьяновской свите очаг действует при температурах 95–100 °С в пределах Пыль-Караминского мегавала.

На рис. 6 приведена схема распределения *относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей*, построенная путем интерполяции значений расчетного показателя R для разрезов 10 скважин.

Схема распределения плотности ресурсов баженовских нефтей (рис. 6), как и схема тогурских нефтей (рис. 4), представляют собой распределения *относительной плотности ресурсов генерированной нефти*. Здесь (рис. 6) относительная плотность ресурсов понимается так: если на участке скважины Толпаровская 1 (То1) плотность ресурсов оценена в 60 усл. ед., а на участке скважины Сенькинская 37 (С37п) – в 30 усл. ед., то это значит, что на первом участке прогнозируемая плотность в 2 раза больше, чем плотность ресурсов на втором участке (*отношение 2:1*).

На рис. 6 видно, что наиболее перспективными зонами на сланцевую нефть баженовской свиты являются северо-западная, северная и юго-западная части Усть-Тымской мегавпадины и обрамляющие здесь ее структуры. Максимальная прогнозируемая плотность ресурсов генерированных нефтей картируется в зоне сочленения Сампатского мезопргиба, Парабельского мегавыступа и Северо-Парабельской мегамоноклинали, также в зоне сочленения Неготского мезопргиба, Александровского свода и Караминской мезоседловины.

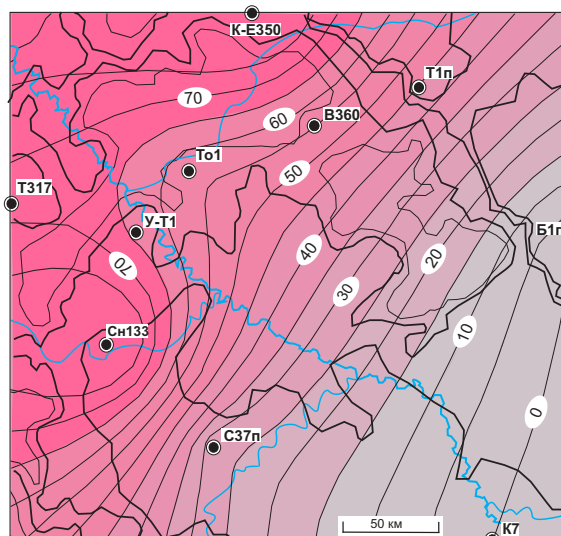


Рис. 6. Схема распределения относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей в Усть-Тымской мегавпадине. Значения изолиний – в величине интегрального показателя R , усл. ед. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2

Fig. 6. The scheme of distribution of the relative density of resources of generated bazhenov oils in Ust-Tym megadepression. The values of isolines – in the value of the integral index of R , cond. u. The rest of the symbols are the same as in Fig. 2

Заключение

На основе реконструкции геотермической истории нефтематеринских тогурских и баженовских отложений впервые выполнено районирование Усть-Тымской мегавпадины и выделены перспективные зоны для поисков сланцевой нефти (аккумулированной *in situ*).

В пределах Усть-Тымской мегавпадины и структур ее обрамления, территории перехода от нефтепромыслов Томской области к слабоизученному Правобережью Оби (рис. 1) наиболее перспективными землями на сланцевую нефть верхнеюрской баженовской свиты являются зона тройного сочленения Сампатского мезопргиба, Парабельского мегавыступа и Северо-Парабельской мегамоноклинали и зона тройного сочленения Неготского мезопргиба, Александровского свода и Караминской мезоседловины (рис. 6).

Подтверждением прогноза высоких перспектив локализованной зоны «Сампатский мезопргиб – Парабельский мегавыступ – Северо-Парабельская мегамоноклинал» является тот факт, что здесь в 2014 г. в пределах Снежного месторождения (рис. 2, табл. 1) компанией ООО «Норд Имперал» в двух скважинах из баженовской свиты, в породах которой *проницаемости нет вообще*, получены притоки нефти порядка 2 т [30]. В этих двух наклонно направленных скважинах, *пробуренных ранее*, использована технология гидроразрыва пласта на низкопроницаемых коллекторах.

В наиболее погруженных частях Усть-Тымской мегавпадины, где картируется нижнеюрская тогурская свита, перспективными землями на сланцевую тогурскую нефть видится практически вся область распространения свиты (рис. 4). Несколько более перспективной проявляется зона сочленения центральной и юго-западной частей Усть-Тымской мегавпадины с Северо-Парабельской мегамоноклиналью.

Интерес к сланцевой нефти тогурской свиты подкрепляется следующими данными. В 2013 г. в Восточно-Пайдугинской мегавпадине (на Правобережье Оби) закончено бурение параметрической скважины Восточно-Пайдугинская № 1 (рис. 1). Скважина вскрыла разрез на глубину 4007 м, включая марьяновскую свиту и юрско-меловые, возможно нефтегазоносные, комплексы, а также тогурскую свиту и, возможно, нефтегазоносный палеозойский комплекс с горизонтом зоны контакта (Грибова И.С., Каракчиев В.В. «Отчет о результа-

тах работ по объекту "Бурение параметрической скважины Восточно-Пайдугинская № 1", ОАО «НПЦ «Недра»», Томскгеолфонд, 2014). Так вот, из интервалов юрско-меловых коллекторов либо притока не получено, либо получена пластовая вода, реже фильтрат бурового раствора, а в интервале марьяновской свиты проявлений УВ не установлено. В то же время из интервала тогурских отложений, при *отсутствии открытой пористости* по ГИС, получен буровой раствор со следами и запахом нефти, а из дезинтегрированных пород доюрских отложений получен буровой раствор со сгустками нефти.

Очевидно, что представленные здесь схемы первого регионально-зонального районирования Усть-Тымской мегавпадины на сланцевую нефть (рис. 4 и 6) будут уточнены и детализированы при учете толщин материнских отложений, концентраций и молекулярного, элементного состава рассеянного органического вещества [3, 31–33].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин А.Е. О природе и перспективах газоносности низкопроницаемых пород осадочной оболочки Земли // Доп. НАН Украины. – 2011. – № 3. – С. 114–123.
2. Кудельский А.В. Геолого-геофизическая несостоятельность сланцевого бумма // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. – № 1. – С. 105–118.
3. Прищепа О.М., Суханова А.А., Макарова И.Р. Методика определения зрелости сапропелевого органического вещества в доминикитах и оценка их углеводородных ресурсов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 7. – С. 4–8.
4. Морариу Д., Аверьянова О.Ю. Некоторые аспекты нефтеносности сланцев: понятийная база, возможности оценки и поиск технологий извлечения нефти // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8. – № 1. URL: http://www.ngtr.ru/rub/9/3_2013.pdf (дата обращения: 01.11.2015).
5. Аверьянова О.Ю. Нефтегазовые системы сланцевых материнских формаций: автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук: 25.00.12. – СПб.: ВНИГРИ, 2015. – 24 с.
6. Оценка запасов «сланцевой нефти» с использованием геохимических параметров / М.В. Дахнова, С.В. Можегова, Е.С. Назарова, И.Л. Пайзанская // Геология нефти и газа. – 2015. – № 4. – С. 55–61.
7. Галушкин Ю.И., Ситар К.А., Куницина А.В. Численное моделирование преобразования органического вещества осадочных горных пород северо-восточного шельфа Сахалина // Океанология. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 521–531.
8. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование нафтидогенеза Южного Ямала // Геофизический журнал. – 2011. – Т. 33. – № 2. – С. 80–104.
9. Историко-геологическое моделирование процессов нафтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря (бассейновое моделирование) / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, Н.А. Мальшев, П.И. Сафронов, С.А. Гуськов, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, Н.С. Ким, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, В.Н. Меленевский, В.Р. Лившиц, А.А. Поляков, М.Б. Скворцов // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1179–1226.
10. Нефтеносность доминиковой продуктивной толщи на территории деятельности НГДУ «Ленингорскнефть» / Р.С. Хисамов, В.Г. Базаревская, А.Ф. Яргиев, Т.И. Тарасова, О.Г. Гибадуллина, О.В. Михайлова // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 10–14.
11. Вассоевич Н.Б. Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние) // Известия АН СССР. Сер. геол. – 1967. – № 11. – С. 135–156.
12. Главная фаза нефтеобразования / Н.Б. Вассоевич, Ю.И. Корчагина, Н.В. Лопатин, В.В. Чернышев // Вестник МГУ. Геология. – 1969. – № 6. – С. 3–27.
13. Connan J. Time-temperature relation in oil genesis // AAPG Bull. – 1974. – V. 5. – P. 2516–2521.
14. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. – М.: Мир, 1982. – 704 с.
15. Конторович А.Э., Парпарова Г.М., Трушков П.А. Метаморфизм органического вещества и некоторые вопросы нефтегазоносности (на примере мезозойских отложений Западно-Сибирской низменности) // Геология и геофизика. – 1967. – № 2. – С. 16–29.
16. Конторович А.Э. Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. – М.: Недра, 1976. – 248 с.
17. Isaev V.I., Fomin A.N. Loci of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuroł'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2006. – V. 47. – № 6. – P. 734–745.
18. 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.
19. 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.
20. Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогнозных ресурсов нефти юрско-меловых НГК Усть-Тымской мегавпадины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
21. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuroł'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.
22. 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.

23. Depositional environments, organic richness, and petroleum generating potential of the Campanian to Maastrichtian Enugu formation, Anambra basin, Nigeria / S.O. Akande, O.J. Ojo, B.D. Erdtmann, M. Hetenyi // *The Pacific Journal of Science and Technology*. – 2009. – V. 10. – P. 614–628.
24. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование процессов генерации и эмиграции углеводородов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 108–113.
25. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
26. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2011. – 331 с.
27. 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.
28. Лобова Г.А. Нефтегазоносность Усть-Тымской мегавпадины // *Геофизический журнал*. – 2013. – Т. 35. – № 4. – С. 28–39.
29. Лобова Г.А. Очаги генерации и первично-аккумулятивные ресурсы баженовских нефтей Усть-Тымской мегавпадины // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 122–128.
30. Каратаев А. Сегодня компания способна внедрять новые технологии своими силами // *Недра и ТЭК Сибири*. – 2015. – № 9. – С. 8–9.
31. Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Геохимия органического вещества и нефтегенерационный потенциал нижнеюрской тогурской свиты (юго-восток Западной Сибири) // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2014. – Т. 9. – № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/1/13_2014.pdf (дата обращения: 11.10.2015).
32. Генерационный потенциал органического вещества юго-востока Западной Сибири (Томская область) / И.В. Гончаров, С.В. Фадеева, В.В. Самойленко, Н.В. Обласов, Е.С. Бахтина // *Нефтяное хозяйство*. – 2014. – № 11. – С. 12–16.
33. Минералого-геохимические особенности баженовской свиты Западной Сибири по данным ядерно-физических и электронно-микроскопических методов исследований / Л.П. Рихванов, Д.Г. Усольцев, С.С. Ильенок, А.В. Ежова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 50–61.

Поступила 05.11.2015 г.

UDC 553.98:551.763:550.836

ZONATION SCHEMES OF UST-TYM MEGADEPRESSION BY DENSITY OF SHALE OIL RESOURCES OF THE TOGUR AND BAZHENOV SOURCE ROCK FORMATIONS

Valeriy I. Isaev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: isaewi@tpu.ru

Galina A. Lobova,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lobovaga@tpu.ru

Vitaliy I. Starostenko,

Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin NAS Ukraine,
32, Palladin Avenue, Kiev, 03142, Ukraine. E-mail: vstar@igph.kiev.ua

Alexander N. Fomin,

Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics of A.A. Trofimuk
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 3, Russia,
Academician Koptyug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.
E-mail: fominan@ipgg.sbras.ru

The relevance of the research is determined by the need of criteria and schemes development of evaluations of hard-to-recover reserves of the shale oil (accumulated in situ) of source rock formations for reproduction and expansion of resource base of hydrocarbon raw materials of the West Siberian petroleum province.

The main aim of the research is to determine a complex of basic geological and geophysical data, a method and technology of regional and areal zonation of source rock depositions by density of shale oil resources, to conduct zonation of the Ust-Tym megadepression.

The object of the research is Lower Jurassic Togur source rock and Upper Jurassic Bazhenov source rock depositions of the Mesozoic and Cenozoic section, opened with deep wells in the southeast of Western Siberia.

The methods of the research. It is accepted that most of shale oil is localized where source rock depositions are/were in the main zone of oil formation and are more heated-up. Zonation method is based on the method of paleotemperature modeling that allows to reconstruct thermal history of source rock depositions, to allocate and map hot spots of oil generation according to geothermal criteria. Evaluation of the oil generation resources is defined by an integrated indicator which depends directly on time of source rock formation discovery in the main zone of oil formation and on its geotemperatures.

The results. The authors demonstrated initial geological and geophysical data, methodological approach, scheme and results of zonation of Togur and Bazhenov formations of the Ust-Tym megadepression fulfilled for the first time by density of shale oil resources. The promising lands for shale oil of the Bazhenov formation are the zone of a threefold joint of the Sampatsky mesodeflection, Parabel megamonoklin and North-Parabel megamonoklin and the zone of a threefold joint of Negotsky mesodeflection, Aleksandrov arch and Karaminsky mesosaddle. The promising lands for shale oil of togur formation are shown in the zone of a joint of the central and southwest parts of the Ust-Tym megadepression with North-Parabel megamonoklin. Zonation reliability is confirmed by oil inflows when hydraulic fracturing Yu_0 occurs in the Snezhnoe field and by drilling results of East-Paydugin № 1 appraisal well.

Key words:

Shale oil, bazhenov and togur formations, the main zone of oil formation, paleotemperature modeling, zonation of the Ust-Tym megadepression.

REFERENCES

- Lukin A.E. O prirode i perspektivakh gazonosnosti nizkopronitsaemykh porod osadochnoy obolochki Zemli [About the nature and prospects of gas content of low-permeability rock of a sedimentary cover of Earth]. *Dop. NAN Ukraini*, 2011, no. 3, pp. 114–123.
- Kudelskiy A.V. Geologo-geofizicheskaya nesostoyatel'nost slantsevogo buma [Geological and geophysical insolubility of slate boom]. *Geophysical Journal*, 2014, vol. 36, no. 1, pp. 105–118.
- Prishchepa O.M., Sukhanova A.A., Makarova I.R. Metodika opredeleniya zrelosti sapropel'evogo organicheskogo veshchestva v domanikitakh i otsenka ikh uglevodorodnykh resursov [Technique of definition of maturity of sapropelic organic substance in the domanikitakh and assessment of their hydrocarbonic resources]. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2015, no. 7, pp. 4–8.
- Morariu D., Averyanova O.Yu. Nekotorye aspekty neftenosnosti slantsev: ponyatiynaya baza, vozmozhnosti otsenki i poisk tekhnologiy izvlecheniya nefiti [Some aspects of oil-bearing capacity of slates: conceptual base, possibilities of an assessment and search of technologies of oil recovery]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2013, vol. 8, no. 1. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/9/3_2013.pdf (accessed 1 November 2015).
- Averyanova O.Yu. *Neftegazovye sistemy slantsevyykh materinskikh formatsiy*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Oil and gas systems of slate maternal formations. Author's abstract Cand. Diss.]. St. Petersburg, VNIGRI Publ., 2015. 24 p.
- Dakhnova M.V., Mozhegova S.V., Nazarova E.S., Payzanskaya I.L. Otsenka zapasov «slantsevoy nefiti» s ispolzovaniem geokhimicheskikh parametrov [Assessment of reserves of «slate oil» with use of geochemical parameters]. *Geology of Oil and Gas*, 2015, no. 4, pp. 55–61.
- Galushkin Yu.I., Sitar K.A., Kunitsina A.V. Chislennoe modelirovaniye preobrazovaniya organicheskogo veshchestva osadochnykh gornyykh porod severo-vostochnogo shelfa Sakhalina [Numerical modeling of transformation of organic substance of sedimentary rocks of the northeast shelf of Sakhalin]. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 521–531.
- Popov S.A., Isaev V.I. Modelirovaniye naftidogeneza Yuzhnogo Yamala [Modeling of naftidogenesis of Southern Yamal]. *Geophysical Journal*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 80–104.
- Kontorovich A.E., Burshteyn L.M., Malyshev N.A., Safonov P.I., Guskov 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. Istoriko-geologicheskoe modelirovaniye protsessov naftidogeneza v mezozoyско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря (бассейновое моделирование) [Historical and geological modeling of processes of naftidogenesis in Mesozoic-Cenozoic sedimentary basin of the Kara Sea (basin modeling)]. *Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
- Khislamov R.S., Bazarevskaya V.G., Yartiev A.F., Tarasova T.I., Gibadullina O.G., Mikhaylova O.V. Neftenosnost domanikovy produktivnoy tolshchi na territorii deyatel'nosti NGDU «Leninogorskneft» [Oil-bearing capacity of domanikovy productive thickness within the territory of activity of OGPД «Leninogorskneft»]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 7, pp. 10–14.
- Vassoevich N.B. Teoriya osadochno-migratsionnogo proiskhozhdeniya nefiti (istoricheskiy obzor i sovremennoe sostoyaniye) [Theory of a sedimentary and migratory origin of oil (historical review and current state)]. *Bulletin of the AN USSR. Ser. Geol.*, 1967, no. 11, pp. 135–156.
- Vassoevich N.B., Korchagina Yu.I., Lopatin N.V., Chernyshov V.V. Glavnaya faza nefteobrazovaniya [The main zone of oil formation]. *Moscow University Geology Bulletin. Geology*, 1969, no. 6, pp. 3–27.
- Connan J. Time-temperature relation in oil genesis. *AAPG Bull.*, 1974, vol. 5, pp. 2516–2521.
- Khant Dzh. *Geokhimiya i geologiya nefiti i gaza* [Geochemistry and geology of oil and gas]. Moscow, Mir Publ., 1982. 704 p.
- Kontorovich A.E., Parparova G.M., Trushkov P.A. Metamorfizm organicheskogo veshchestva i nekotorye voprosy neftegazonosnosti (na primere mezozoysskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy nizmennosti) [Metamorphism of organic substance and some questions of petroleum content (on the example of mesozoic deposits of the West Siberian lowland)]. *Geology and Geophysics*, 1967, no. 2, pp. 16–29.
- Kontorovich A.E. *Geokhimicheskie metody kolichestvennogo prognoza neftegazonosnosti* [Geochemical methods of the quantitative forecast of oil and gas potential]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 248 p.
- Isaev V.I., Fomin A.N. Loci of oil generation of the Bazhenov- and Togur-type oils in the southern of the Nyurolsky megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
- 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.
- Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I. Neftegazonosnost nizhnemelovykh rezervuarov Nyurolskoy megavpadiny [Petroleum potential of the Lower Cretaceous reservoirs of Nyurolka megadepression]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 14733.
- Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. Lokalizatsiya prognoznykh resursov nefiti yursko-melovykh neftegazonosnykh kompleksov Ust-Tymskoy megavpadiny [Probable oil resource localization for Jurassic and Cretaceous oil-and-gas complexes of the Ust-Tym megadepression]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2013, no. 2, pp. 36–40.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurolka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.
- Tissot B.R. 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.

23. Akande S.O., Ojo O.J., Erdtmann B.D., Hetenyi M. Depositional environments, organic richness, and petroleum generating potential of the Campanian to Maastrichtian Enugu formation, Anambra basin, Nigeria. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 2009, vol. 10, pp. 614–628.
24. Popov S.A., Isaev V.I. Modelirovanie protsessov generatsii i emigratsii uglevodorodov [Modeling of processes of generation and emigration of hydrocarbons]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 104–110.
25. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoysskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil-and-gas petroleum potential of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern regions of West Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p.
26. Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegazonosnost mezozoyskikh i paleozoyskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyna* [Catagenesis of organic matter and oil-and-gas of the Mesozoic and Paleozoic deposits of the Western Siberian megabasin]. Novosibirsk, INGG SO RAN Publ., 2011. 331 p.
27. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity) [The model of katagenesis of organic matter (for example, the Bazhenov Formation)]. *Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
28. Lobova G.A. Neftegazonosnost Ust-Tymskoy megavpadiny [Petroleum potential of the Ust-Tym megadepression]. *Geophysical Journal*, 2013, vol. 35, no. 4, pp. 28–39.
29. Lobova G.A. Ochagi generatsii i pervichno-akkumulirovannye resursy bazhenovskikh neftey Ust-Tymskoy megavpadiny [The generation centers and primary accumulated resources of the Bazhenov oils in the Ust-Tym megadepression]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 122–128.
30. Karataev A. Segodnya kompaniya sposobna vnedryat novye tekhnologii svoimi silami [Today the company is capable to introduce new technologies by own efforts]. *Nedra i TEK Sibiri*, 2015, no. 9, pp. 8–9.
31. Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Yan P.A. Geokhimiya organicheskogo veshchestva i neftegeneratsionnyy potentsial nizhneyurskoy togurskoy svity (yugo-vostok Zapadnoy Sibiri) [Geochemistry of organic matter and petrogenative potential of Lower Jurassic togur suite (south-east of Western Siberia)]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2014, vol. 9, no. 1. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/1/13_2014.pdf (accessed 11 October 2015).
32. Goncharov I.V., Fadeeva S.V., Samoilenko V.V., Oblasov N.V., Bakhtina E.S. Generatsionnyy potentsial organicheskogo veshchestva yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri (Tomskaya oblast) [Generative potential of organic substance of the southeast of Western Siberia (Tomsk region)]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2014, no. 11, pp. 12–16.
33. Rikhvanov L.P., Usoltsev D.G., Ilenok S.S., Ezhova A.V. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri po dannym yaderno-fizicheskikh i elektronno-mikroskopicheskikh metodov issledovaniy [Mineralogical and geochemical features of the Bazhenov suite of Western Siberia according to nuclear and physical and electronic and microscopic methods of researches]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 50–61.

Received: 5 November 2015.

УДК 62–752+62–755

ВИД И СТРУКТУРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ И ПРОЦЕССА УРАВНОВЕШИВАНИЯ РОТОРНОЙ МАШИНЫ С АВТОБАЛАНСИРАМИ

Гончаров Валерий Владимирович,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики факультета проектирования и эксплуатации машин Кировоградского национального технического университета, Украина, 25006, г. Кировоград, пр. Университетский, 8. E-mail: matkora@yandex.ru.

Филимоныхин Геннадий Борисович,

доктор технических наук, профессор кафедры деталей машин и прикладной механики факультета проектирования и эксплуатации машин Кировоградского национального технического университета, Украина, 25006, г. Кировоград, пр. Университетский, 8. E-mail: filimonikhin@yandex.ua.

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования процесса уравновешивания автобалансирами роторных машин в оборудовании объектов добычи и транспортировки георесурсов, в частности в шахтных вентиляторах, в газотурбинных установках при транспортировке природного газа.

Цель работы. Установить структуру и конкретизировать вид дифференциальных уравнений, описывающих движение роторной машины с автобалансирами со многими корректирующими грузами и процесс уравновешивания ротора автобалансирами.

Методы исследования. Элементы теоретической механики, теории устойчивости движений механических систем по Ляпунову, теории роторных машин.

Результаты. В рамках упрощенной теории роторных машин с автобалансирами со многими корректирующими грузами установлена структура и конкретизирован вид систем дифференциальных уравнений, описывающих движение роторной машины и процесс уравновешивания ротора автобалансирами.

Установлено, что роторная машина условно состоит из нескольких взаимодействующих между собой частей – ротора (ротора в корпусе) и неуравновешенных автобалансиров. Неуравновешенные автобалансиры действуют на ротор с силами, приложенными в точках подвеса автобалансиров и равными вторым производным по времени от векторов суммарных дисбалансов. Ротор влияет на движение корректирующих грузов в автобалансирах переносными силами инерции, пропорциональными ускорениям точек подвеса автобалансира.

Система дифференциальных уравнений, описывающая движение роторной машины, составлена относительно обобщенных координат машины. Эта система состоит из двух и более связанных подсистем.

Первая – описывает движение ротора. Ее всегда можно записать относительно обобщенных координат, описывающих движение ротора и изменение суммарных дисбалансов ротора и автобалансира в каждой плоскости коррекции. При этом если ротор установлен с возможностью вращения вокруг своей продольной оси в корпус, удерживаемый податливыми опорами, то ротор и корпус образуют условный составной ротор (более массивный и вытянутый, чем сам ротор) и уравнения составляются для него.

Количество остальных подсистем равно числу автобалансиров, уравновешивающих ротор. При этом подсистема, соответствующая j -му автобалансиру, имеет стандартный вид и описывает движение корректирующих грузов в этом автобалансирах. Она состоит из n_j дифференциальных уравнений, где n_j – количество корректирующих грузов в j -м автобалансирах.

Система дифференциальных уравнений, описывающая процесс автобалансировки роторной машины, составлена относительно обобщенных координат ротора и проекций суммарных дисбалансов ротора и автобалансира в каждой плоскости коррекции. Она предназначена для исследования устойчивости семей основных движений и протекания переходных процессов при наступлении автобалансировки. Эта система также состоит из двух и более связанных подсистем. Первая – получается из подсистемы, описывающей движение ротора, если ее записать относительно обобщенных координат ротора и суммарных дисбалансов. Количество остальных подсистем также равно числу автобалансиров. Каждая из этих подсистем имеет стандартный вид и состоит из двух уравнений, получающихся путем комбинирования уравнений движения корректирующих грузов соответствующего автобалансира.

Сформулированы правила составления дифференциальных уравнений, описывающих движение роторной машины и процесс автобалансировки. Они применимы: при любой кинематике движения ротора или ротора, помещенного в корпус; любом количестве автобалансиров; любом количестве и разных типах корректирующих грузов в автобалансирах. Вид дифференциальных уравнений первой подсистемы подтвержден с использованием основных теорем динамики.

Сформулированные правила применены для роторной машины, состоящей из ротора, помещенного с возможностью вращения в корпус, удерживаемый податливыми опорами, и двух автобалансиров.

Ключевые слова:

Роторная машина, ротор, дисбаланс, автобалансиры, дифференциальные уравнения, автобалансировка, переходные процессы.

Введение

В роторах многих газотурбинных установок [1] (использующихся в нефтегазовой промышленности для энергообеспечения геолого-разведочных работ), турбокомпрессорных комплексов [2] (ис-

пользующихся при транспортировке природного газа и его закачке в подземные хранилища), шахтных вентиляторов [3] (использующихся для принудительной вентиляции шахт и рудников) могут возникать значительные меняющиеся в процессе

эксплуатации дисбалансы. Для уравнивания на ходу таких быстровращающихся роторов целесообразно использовать пассивные автобалансиры (АБ) [4, 5]. Со временем движение ротора и корригирующих грузов (КГ) в АБ устанавливается. На основных движениях КГ уравнивают ротор и вращаются с ним как одно целое вокруг оси, образованной опорами, а на побочных – нет.

Для аналитического исследования движения роторных машин с АБ со многими КГ и переходных процессов при наступлении автобалансировки актуально составление дифференциальных уравнений движения машины, а по ним – дифференциальных уравнений, описывающих процесс наступления автобалансировки.

В работах [6–18] получены уравнения движения некоторых конкретных роторных машин с АБ с использованием общих уравнений динамики или уравнений Лагранжа 2-го рода. Такой подход громоздкий, так как для каждой новой машины нужно заново выводить уравнения движения. Также в этих работах рассматриваются АБ с двумя КГ. В этом случае у машины существуют только изолированные основные движения, и дифференциальные уравнения движения машины одновременно описывают процесс наступления автобалансировки. Однако в реальных АБ используются более двух КГ.

В работах [19–21] применен метод составления дифференциальных уравнений, поддающихся аналитическому анализу: вначале, с учетом соотношений малости, составляются дифференциальные уравнения движения роторной машины с АБ со многими КГ; затем из этих уравнений получается замкнутая система относительно минимального количества переменных, описывающих процесс автобалансировки, – обобщенных координат, описывающих движение ротора и изменение суммарного дисбаланса вращающихся частей машины. Метод был реализован для роторов с неподвижной точкой и на податливых опорах с одно- или двухрядным АБ. Он позволил преодолеть проблемы, возникающие при переизбытке КГ, и исследовать устойчивость семьи установившихся движений. Однако в предложенном методе используются уравнения Лагранжа 2-го рода, поэтому он является достаточно громоздким.

В работах [22, 23] изучалась структура дифференциальных уравнений движения роторных машин с АБ со многими КГ. При этом рассмотрено только плоскопараллельное движение ротора. Уравнения движения выводились с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода, что делало этот процесс громоздким. Также не конкретизировалась структура уравнений движения.

В данной работе с использованием результатов работ [19–21] установлены структура и вид дифференциальных уравнений движения роторных машин с АБ со многими КГ и вид уравнений, описывающих процесс наступления автобалансировки. Сформулированы правила составления соответствующих дифференциальных уравнений. Приме-

нение правил проиллюстрировано на примере роторной машины, состоящей из ротора, помещенного с возможностью вращения в корпус, удерживаемый податливыми опорами, и двух АБ.

Общие сведения о роторной машине с АБ и упрощающие предположения

Рассматриваются шаровые, роликовые или маятниковые АБ.

Центры масс КГ в АБ движутся в одной плоскости по окружностям, имеющим общий центр. Плоскость называется плоскостью АБ, общий центр – центром АБ. Ось, перпендикулярная плоскости АБ, проходящая через его центр, называется продольной осью АБ.

Считается, что КГ не мешают двигаться друг другу и в случае шаров или роликов имеют радиусы, намного меньшие радиусов их беговых дорожек.

Ротор – статически или динамически неуравновешен. Его удерживают упруго-вязкие опоры или он помещен в корпус с возможностью вращения вокруг продольной оси, а уже корпус удерживает упруго-вязкие опоры. Во втором случае центры масс и направления главных центральных осей инерции ротора и корпуса совпадают.

Статически неуравновешенный ротор уравнивается в одной плоскости коррекции одним АБ, а динамически – в двух плоскостях коррекции двумя АБ. При этом плоскости АБ совмещаются с соответствующими плоскостями коррекции, а центры располагаются на продольной оси ротора. Точку на продольной оси ротора, совпадающую с центром АБ, будем называть точкой подвеса АБ.

Статический дисбаланс ротора, лежащий в определенной плоскости коррекции, будем формально относить к соответствующему АБ. При этом ротор станет уравновешенным. В дальнейшем под понятием ротор будем иметь в виду уравновешенный ротор, а АБ со статическим дисбалансом ротора для краткости будем называть неуравновешенным АБ.

В процессе движения роторной машины малыми являются отклонения продольной оси ротора от ее равновесного положения и отношение массы КГ к массе ротора (ротора с корпусом).

Как это принято в теории роторных машин с АБ, при составлении дифференциальных уравнений движения системы действием сил тяжести пренебрегаем.

Уравнения, полученные с учетом указанных выше предположений и соотношений малости (линеаризованные по обобщенным координатам ротора и малому параметру), будем для краткости называть *упрощенными*.

Структура дифференциальных уравнений движения роторных машин с АБ

Анализ упрощенных дифференциальных уравнений движения роторных машин с АБ, полученных в работах [19–21], показывает, что они состоят из нескольких связанных подсистем дифференциальных уравнений.

Уравнения первой подсистемы описывают движение ротора (получены из уравнений Лагранжа 2-го рода, составленных для обобщенных координат ротора). Из их вида следует, что эти уравнения можно записать только относительно координат ротора и суммарных дисбалансов, создаваемых АБ. Силы от суммарных дисбалансов приложены в точках подвеса АБ и равны вторым производным по времени от суммарных дисбалансов.

Если ротор установлен в корпус, то они образуют условный уравновешенный составной ротор (далее – составной ротор), более массивный и вытянутый, чем сам ротор.

Число остальных подсистем равно l – числу АБ, уравновешивающих ротор. При этом j -я $/j=1, l/$ подсистема соответствует j -му АБ и описывает движение КГ в этом АБ. Данная подсистема получена из уравнений Лагранжа 2-го рода, составленных для обобщенных координат, описывающих движение КГ в АБ. Она состоит из n_j дифференциальных уравнений, где n_j – количество КГ в j -м АБ. Из вида этой подсистемы следует, что:

- статический дисбаланс и КГ совершают плоскопараллельные движения в плоскостях коррекции АБ;
- ротор влияет на дифференциальные уравнения движения КГ в неуравновешенном АБ только ускорением точки подвеса АБ (это ускорение зависит от положения точки на продольной оси ротора и обобщенных координат ротора);
- вид КГ учитывается коэффициентом, характеризующим кинетическую энергию вращательного движения КГ вокруг его центра масс.

Таким образом, динамически роторная машина разбивается на $1+l$ частей – ротор (составной ротор) и l неуравновешенных АБ. Эти части взаимодействуют друг с другом через точки подвеса АБ:

- ротор (составной ротор) влияет на движение неуравновешенных АБ ускорениями соответ-

ствующих точек подвеса, порождающими моменты от переносных сил инерции;

- неуравновешенные АБ влияют на движение ротора (составного ротора) силами от суммарных дисбалансов, приложенными в точках подвеса АБ.

Уравнения движения ротора на упруго-вязких опорах

Данная задача (движение самого ротора без АБ и корпуса) рассматривается как основа при дальнейших обобщениях.

На рис. 1 приведена модель движения осесимметричного ротора (составного ротора) с дисбалансом для случая податливых опор. Здесь G – центр масс ротора; $Oxyz$ – неподвижная система осей (в исходном положении точки G и O совпадают); $Gx_Gy_Gz_G$ – подвижная система осей, получаемая при поступательном движении осей $Oxyz$; $Guvw$ – подвижная система осей, получаемая при повороте осей $Gx_Gy_Gz_G$ на углы Резаля α, β ; $G\xi\eta\zeta$ – подвижная, жестко связанная с ротором система осей, получающаяся при повороте осей $Guvw$ на угол ωt , где ω – скорость вращения ротора.

Уравнения, описывающие поступательное движение ротора, получаются из теоремы о движении центра масс механической системы:

$$m_r \ddot{\rho}_r = \mathbf{R}^{(e)}, \quad (1)$$

где m_r – масса ротора; $\rho_r = (x, y, z)^T$ – радиус-вектор центра масс ротора; $\mathbf{R}^{(e)}$ – главный вектор внешних сил, действующих на систему.

Уравнения, описывающие вращательное движение ротора, получаются из теоремы об изменении момента количества движений механической системы:

$$\frac{d'}{dt} (\mathbf{L}_r)_{uvw} + \boldsymbol{\omega}_{uvw} \cdot (\mathbf{L}_r)_{uvw} = \mathbf{M}_G^{(e)}, \quad (2)$$

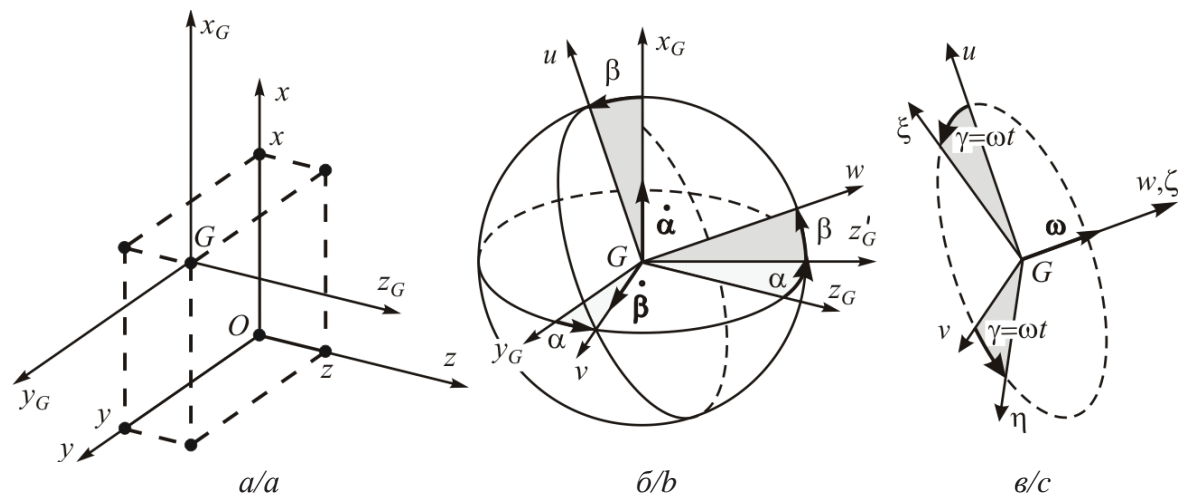


Рис. 1. Кинематика движения ротора на податливых опорах: а) поступательное движение ротора; б) поворот ротора на углы Резаля; в) поворот ротора вокруг продольной оси

Fig. 1. Kinematics of rotor compliant supports: а) forward movement of the rotor; б) rotation of the rotor by the Rezal angles; в) rotation of the rotor around the longitudinal axis

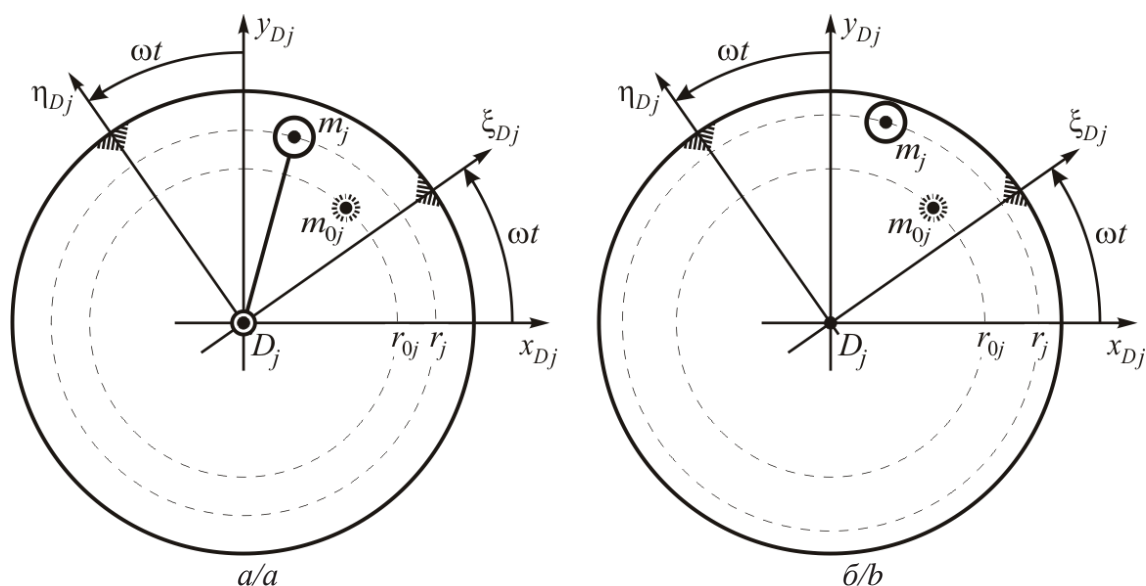


Рис. 2. Схема плоскопараллельного движения неуравновешенного АБ в плоскости коррекции: а) маятниковый АБ; б) шаровой или роликовый АБ

Fig. 2. Scheme of plane motion of unbalanced auto-balancer in the compensation plane: a) movement of the pendulum; b) movement of the ball or a cylindrical roller

где $(L_r)_{uvw} = J_r(\omega_r)_{uvw}$ – вектор момента количества движения ротора в проекциях на оси подвижной системы координат $Guvw$; $J_r = \text{Diag}(A_r, A_r, C_r)$ – тензор инерции ротора относительно его главных центральных осей инерции $Guvw$; $\frac{d'}{dt}(L_r)_{uvw}$ – относи-

тельная производная вектора $(L_r)_{\xi\eta\zeta}$, определяющая его изменение в подвижной системе координат $Guvw$; $(\omega_r)_{uvw} = (\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \omega)^T$ – вектор угловой скорости вращения ротора в проекциях на оси подвижной системы координат $Guvw$; $(\omega_{uvw}) = (\dot{\alpha}, \dot{\beta}, 0)^T$ – вектор угловой скорости вращения осей $Guvw$ в проекциях на эти же оси; $M_G^{(e)}$ – главный момент внешних сил, действующих на роторную машину, найденный относительно ее центра масс – точки G .

Уравнения, описывающие движение КГ

Описание АБ. Для уравновешивания жестких роторов имеет смысл устанавливать один ($l=1$) или два ($l=2$) АБ.

Для статического уравновешивания ротора устанавливается один АБ в плоскости статического дисбаланса (плоскости расположения точечной массы, создающей статический дисбаланс ротора) или как можно ближе к ней. Тогда при наступлении автобалансировки, если АБ установлен: в плоскости статического дисбаланса, динамические реакции опор ротора равны нулю; вблизи плоскости статического дисбаланса – не равны нулю (имеются остаточные динамические реакции опор).

Для динамического уравновешивания ротора устанавливаются два АБ. При этом плоскости коррекции располагаются на некотором расстоянии друг от друга. Тогда при наступлении автобалансировки динамические реакции опор равны нулю.

j -й АБ $/j=\overline{1, l}/$ состоит из n_j КГ в виде маятников, шаров или цилиндрических роликов. В j -м маятниковом АБ на вал ротора насажено n_j математических маятников одинаковой массы m_j и длины r_j . В j -м шаровом или роликовом АБ n_j шаров или цилиндрических роликов одинаковой массы m_j катятся без скольжения по кольцевой дорожке, при этом расстояние от продольной оси ротора до центра шара или продольной оси ролика равно r_j .

j -й АБ движется плоскопараллельно в плоскости, перпендикулярной оси z и проходящей через точку подвеса АБ. Угловые движения АБ малы и не принимаются во внимание.

Обобщенные координаты, определяющие движения КГ относительно ротора. На рис. 2 показана схема плоскопараллельного движения j -го $/j=\overline{1, l}/$ неуравновешенного АБ в плоскости коррекции. Здесь D_j , $/j=\overline{1, l}/$ – точки подвеса j -го АБ; $D_j x_{Dj} y_{Dj}$, $D_j \xi_{Dj} \eta_{Dj}$ – системы осей, параллельные осям соответственно системы Oxy и $G\xi\eta$; m_{0j} – точечная масса, образующая (статический) дисбаланс s_{0j} ротора в соответствующей плоскости коррекции; m_j , $/j=\overline{1, l}/$ – центр масс и масса КГ (маятника – рис. 2, а; шара или ролика – рис. 2, б).

Положение массы дисбаланса или i -го $/i=\overline{1, n_j}; /j=\overline{1, l}/$ КГ в j -м АБ определяется абсолютным $\varphi_{i,j}$ (рис. 3, а) или относительным углом $\psi_{i,j}$ (рис. 3, б), отсчитываемым, соответственно, между осью $D_j x_{Dj}$ или $D_j \xi_{Dj}$, и относительным радиус-вектором $r_{i,j}$, $/i=\overline{1, n_j}; /j=\overline{1, l}/$ массы дисбаланса или центра масс КГ. Абсолютные и относительные углы связаны соотношениями:

$$\varphi_{i,j} = \omega t + \psi_{i,j}, \quad \psi_{0j} = \text{const}, \quad /i = \overline{0, n_j}, j = \overline{1, l} / . \quad (3)$$

Относительному движению шаров или роликов соответствуют ньютоновские силы вязкого сопро-

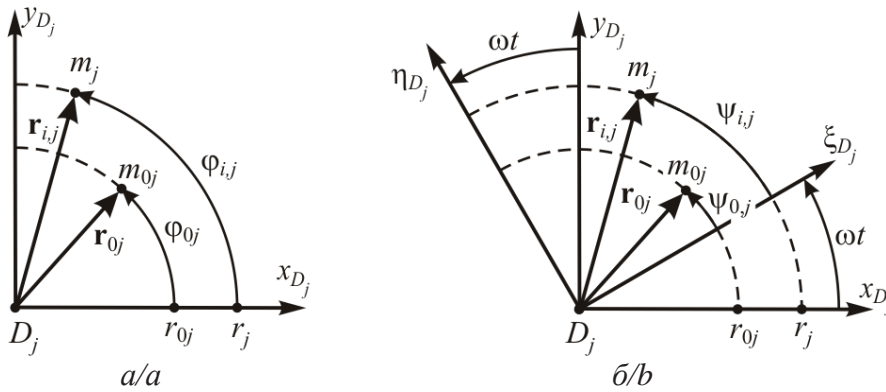


Рис. 3. Кинематика движения КГ и массы дисбаланса: а) абсолютные углы; б) относительные углы

Fig. 3. Kinematics of corrective weights and imbalance mass: a) absolute; b) relative angles

твления, модули которых равны: $F_{i,j}^{(vis)} = b_j r_j |\dot{\psi}_{i,j}|$, $/i=\overline{1, n_j}; /j=\overline{1, l}/$, где b_j – коэффициент сил вязкого сопротивления.

При повороте i -го маятника вокруг оси ротора на него действует момент сил вязкого сопротивления $M_{i,j}^{(vis)} = r_j^2 b_j |\dot{\psi}_{i,j}|$, $/i=\overline{1, n_j}; /j=\overline{1, l}/$, где b_j – коэффициент момента сил вязкого сопротивления, приведенный к плечу r_j .

Правило составления упрощенных дифференциальных уравнений, описывающих движение КГ. В работах [20, 21] показано, что при установке АБ соосно продольной оси ротора, уравнения, описывающие движение КГ, имеют вид

$$\begin{aligned} & \kappa_j m_j r_j \ddot{\varphi}_{i,j} + b_j r_j (\dot{\varphi}_{i,j} - \omega) - \\ & - m_j (a_{D_j,x} \sin \varphi_{i,j} - a_{D_j,y} \cos \varphi_{i,j}) = 0, \\ & /j = \overline{1, l}, i = \overline{1, n_j} / \end{aligned} \quad (4)$$

или в относительных углах

$$\begin{aligned} & \kappa_j m_j r_j \ddot{\psi}_{i,j} + b_j r_j \dot{\psi}_{i,j} - \\ & - m_j [a_{D_j,x} \sin(\omega t + \psi_{i,j}) - a_{D_j,y} \cos(\omega t + \psi_{i,j})] = 0, \\ & /j = \overline{1, l}, i = \overline{1, n_j} / , \end{aligned}$$

где $i, j, /j=\overline{1, l}, i=\overline{1, n_j}/$ – соответственно, номер КГ и АБ; $a_{D_j,x}, a_{D_j,y}, /j=\overline{1, l}/$ – проекции ускорения точек подвеса АБ на оси системы $D_j x_{D_j} y_{D_j}$;

$$\kappa_j = 1 + \kappa_j^{(bp)},$$

$$\kappa_j^{(bp)} = \begin{cases} 2/5, & \text{для шара;} \\ 1/2, & \text{для цилиндрического ролика;} \\ 0, & \text{для маятника.} \end{cases} /j = \overline{1, l}/$$

– коэффициент, характеризующий кинетическую энергию вращательного движения КГ.

Сформулируем правило составления дифференциальных уравнений, описывающих движение КГ:

1. Задаем положения точек подвеса $D_j, /j=\overline{1, l}/$ АБ на продольной оси ротора – их расстояние от центра масс ротора z_j .

2. Определяем проекции $a_{D_j,x}, a_{D_j,y}$ ускорений этих точек. Например, для роторной машины с неподвижной точкой они имеют вид $a_{D_j,x} \approx z_j \ddot{\beta}$, $a_{D_j,y} \approx z_j \ddot{\alpha}$, $/j=\overline{1, l}/$ (см. [20]), а для роторной машины на податливых опорах – $a_{D_j,x} \approx x_{D_j} + z_j \ddot{\beta}$, $a_{D_j,y} \approx y_{D_j} + z_j \ddot{\alpha}$, $/j=\overline{1, l}/$ (см. [21]).
3. Помещаем найденные ускорения в систему уравнений (4).

Дифференциальные уравнения, описывающие изменение проекций суммарного дисбаланса. В работах [20, 21] устойчивость установившихся движений впервые предложено исследовать по обобщенным координатам, определяющим положение ротора и суммарный дисбаланс. Уравнения движения КГ (4) существенно нелинейные.

Покажем, что при выполнении некоторых условий из уравнений движения КГ (4) можно получить уравнения, описывающие изменение суммарных дисбалансов, т. е. можно замкнуть уравнения, описывающие движение ротора.

Преобразуем систему уравнений (4):

1. Предполагается, что существуют основные установившиеся движения роторной машины, при этом положения КГ определяются значениями относительных углов:

$$\tilde{\psi}_{i,j}, /i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / . \quad (5)$$

2. Перейдем в уравнениях (4) от абсолютных углов $\varphi_{i,j}, /i=\overline{1, n_j}; /j=\overline{1, l}/$, описывающих положение КГ, к проекциям их дисбаланса $s_{i,j,x}, s_{i,j,y}$:

$$\begin{aligned} s_{i,j,x} &= m_j r_j \cos \varphi_{i,j}, \quad s_{i,j,y} = m_j r_j \sin \varphi_{i,j}, \\ /i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / . \end{aligned} \quad (6)$$

При этом

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i,j,x} &= -\dot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,y}, \quad \dot{s}_{i,j,y} = \dot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,x}, \\ \ddot{s}_{i,j,x} &= -\ddot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,y} - \dot{\varphi}_{i,j}^2 s_{i,j,x}, \\ \ddot{s}_{i,j,y} &= \ddot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,x} - \dot{\varphi}_{i,j}^2 s_{i,j,y}, /i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / . \end{aligned} \quad (7)$$

Вместо i -го уравнения в (4) запишем два уравнения: первое – произведение i -го уравнения на $\sin \varphi_{i,j}$, а второе – на $\cos \varphi_{i,j}$. После преобразований с учетом (6), (7) эти уравнения примут вид:

$$s_{i,j,y} \ddot{\varphi}_{i,j} + \frac{b_j}{\kappa_j m_j} (\dot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,y} - \omega s_{i,j,y}) =$$

$$= \frac{m_j}{2\kappa_j} [a_{D_j,x} (1 - \cos 2\varphi_{i,j}) - a_{D_j,y} \sin 2\varphi_{i,j}],$$

$$s_{i,j,x} \ddot{\varphi}_{i,j} + \frac{b_j}{\kappa_j m_j} (\dot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,x} - \omega s_{i,j,x}) =$$

$$= \frac{m_j}{2\kappa_j} [a_{D_j,x} \sin 2\varphi_{i,j} - a_{D_j,y} (1 + \cos 2\varphi_{i,j})].$$

Из (7) можно получить

$$\dot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,y} = -\dot{s}_{i,j,x}, \quad \dot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,x} = \dot{s}_{i,j,y},$$

$$\ddot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,y} = -\ddot{s}_{i,j,x} - \dot{\varphi}_{i,j}^2 s_{i,j,x},$$

$$\ddot{\varphi}_{i,j} s_{i,j,x} = \ddot{s}_{i,j,y} + \dot{\varphi}_{i,j}^2 s_{i,j,y}, \quad / i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / . \quad (8)$$

Тогда

$$\ddot{s}_{i,j,x} + \dot{\varphi}_{i,j}^2 s_{i,j,x} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{i,j,x} + \omega s_{i,j,y}) =$$

$$= -\frac{m_j}{2\kappa_j} [a_{D_j,x} (1 - \cos 2\varphi_{i,j}) - a_{D_j,y} \sin 2\varphi_{i,j}],$$

$$\ddot{s}_{i,j,y} + \dot{\varphi}_{i,j}^2 s_{i,j,y} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{i,j,y} - \omega s_{i,j,x}) =$$

$$= \frac{m_j}{2\kappa_j} [a_{D_j,x} \sin 2\varphi_{i,j} - a_{D_j,y} (1 + \cos 2\varphi_{i,j})],$$

$$/ i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / . \quad (9)$$

3. Линеаризуем уравнения (9) в окрестности одного из установившихся движений (5):

$$\psi_{i,j} = \tilde{\psi}_{i,j} + \psi_{i,j}^{(e)}, \quad \dot{\psi}_{i,j} = \dot{\psi}_{i,j}^{(e)},$$

$$|\psi_{i,j}^{(e)}| \ll 1, \quad |\dot{\psi}_{i,j}^{(e)}| \ll 1, \quad / i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / , \quad (10)$$

где $\tilde{\psi}_{i,j}$, $/ i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} /$ – постоянные значения углов, определяющих определенное основное движение (из семьи основных движений, если такие движения образуют семью), $\psi_{i,j}^{(e)}$, $/ i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} /$ – отклонения от основного движения.

Из (3) и (10) следует, что

$$\dot{\varphi}_{i,j} = \omega + \dot{\psi}_{i,j}^{(e)}, \quad \dot{\psi}_{i,j}^{(e)} = \dot{\varphi}_{i,j} - \omega, \quad / i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / ,$$

поэтому с точностью до величин первого порядка малости включительно

$$\dot{\varphi}_{i,j}^2 = \omega^2 + 2\omega \dot{\psi}_{i,j}^{(e)} + (\dot{\psi}_{i,j}^{(e)})^2 \approx$$

$$\approx \omega^2 + 2\omega \dot{\psi}_{i,j}^{(e)} = 2\omega \dot{\varphi}_{i,j} - \omega^2,$$

$$/ i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} /$$

и уравнения (9) принимают вид

$$\ddot{s}_{i,j,x} + 2\omega \dot{s}_{i,j,y} - \omega^2 s_{i,j,x} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{i,j,x} + \omega s_{i,j,y}) =$$

$$= -\frac{m_j}{2\kappa_j} \left\{ a_{D_j,x} [1 - \cos(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j})] - \right.$$

$$\left. - a_{D_j,y} \sin(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j}) \right\},$$

$$\ddot{s}_{i,j,y} - 2\omega \dot{s}_{i,j,x} - \omega^2 s_{i,j,y} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{i,j,y} - \omega s_{i,j,x}) =$$

$$= \frac{m_j}{2\kappa_j} \left\{ a_{D_j,x} \sin(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j}) - \right.$$

$$\left. - a_{D_j,y} [1 + \cos(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j})] \right\},$$

$$/ i = \overline{1, n_j}; j = \overline{1, l} / . \quad (11)$$

Кроме того, с (3) следует, что для проекций $s_{0,j,x}$, $s_{0,j,y}$ статических дисбалансов $s_{0,j}$, $/ j = \overline{1, l} /$ имеют место равенства:

$$s_{0,j,x} = m_0 r_0 \cos \varphi_{0,j} = m_0 r_0 \cos(\omega t + \psi_{0,j}),$$

$$s_{0,j,y} = m_0 r_0 \sin \varphi_{0,j} = m_0 r_0 \sin(\omega t + \psi_{0,j}),$$

$$\dot{s}_{0,j,x} = -\omega m_0 r_0 \sin(\omega t + \psi_{0,j}) = -\omega s_{0,j,y},$$

$$\dot{s}_{0,j,y} = \omega m_0 r_0 \cos(\omega t + \psi_{0,j}) = \omega s_{0,j,x},$$

$$\ddot{s}_{0,j,x} = -\omega \dot{s}_{0,j,y} = -\omega \omega s_{0,j,x} = -\omega^2 s_{0,j,x},$$

$$\ddot{s}_{0,j,y} = \omega \dot{s}_{0,j,x} = \omega(-\omega s_{0,j,y}) = -\omega^2 s_{0,j,y}$$

поэтому

$$\ddot{s}_{0,j,x} + 2\omega \dot{s}_{0,j,y} - \omega^2 s_{0,j,x} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{0,j,x} + \omega s_{0,j,y}) = 0,$$

$$\ddot{s}_{0,j,y} - 2\omega \dot{s}_{0,j,x} - \omega^2 s_{0,j,y} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{0,j,y} - \omega s_{0,j,x}) = 0,$$

$$/ j = \overline{1, l} / . \quad (12)$$

4. Суммируем по i , $/ j = \overline{1, l} /$ первое и второе уравнения системы (11) и прибавляем к ним соответствующее уравнение из (12):

$$\ddot{s}_{j,x} + 2\omega \dot{s}_{j,y} - \omega^2 s_{j,x} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{j,x} + \omega s_{j,y}) =$$

$$= -\frac{1}{2} \frac{m_j}{\kappa_j} \sum_{i=1}^{n_j} \left\{ a_{D_j,x} [1 - \cos(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j})] - \right.$$

$$\left. - a_{D_j,y} \sin(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j}) \right\},$$

$$\ddot{s}_{j,y} - 2\omega \dot{s}_{j,x} - \omega^2 s_{j,y} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{j,y} - \omega s_{j,x}) =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{m_j}{\kappa_j} \sum_{i=1}^{n_j} \left\{ a_{D_j,x} \sin(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j}) - \right.$$

$$\left. - a_{D_j,y} [1 + \cos(2\omega t + 2\tilde{\psi}_{i,j})] \right\},$$

$$/ j = \overline{1, l} / , \quad (13)$$

где

$$s_{j,x} = \sum_{i=0}^{n_j} s_{i,j,x} = \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j} r_{i,j} \cos \varphi_{i,j},$$

$$s_{j,y} = \sum_{i=0}^{n_j} s_{i,j,y} = \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j} r_{i,j} \sin \varphi_{i,j}, \quad / j = \overline{1, l} / \quad (14)$$

– проекции суммарного дисбаланса s_j в j -й плоскости коррекции.

Уравнения (13) можно привести к виду

$$\ddot{s}_{j,x} + 2\omega \dot{s}_{j,y} - \omega^2 s_{j,x} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{j,x} + \omega s_{j,y}) =$$

$$= -\frac{1}{2} \frac{m_j n_j}{\kappa_j} \left\{ a_{D_j,x} [1 - p_j \cos(2\omega t + 2\vartheta_j)] - \right.$$

$$\left. - a_{D_j,y} p_j \sin(2\omega t + 2\vartheta_j) \right\},$$

$$\begin{aligned} & \ddot{s}_{j,y} - 2\omega\dot{s}_{j,x} - \omega^2 s_{j,y} + \frac{b_j}{m_j \kappa_j} (\dot{s}_{j,y} - \omega s_{j,x}) = \\ & = \frac{1}{2} \frac{m_j n_j}{\kappa_j} \left\{ a_{D_j,x} P_j \sin(2\omega t + 2\vartheta_j) - \right. \\ & \quad \left. - a D_{jD_j,y} [1 + p_j \cos(2\omega t + 2\vartheta_j)] \right\}, \\ & \quad / j = \overline{1, l}, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \cos 2\vartheta_j &= \frac{P_{1j}}{p_j}, \quad \sin 2\vartheta_j = \frac{P_{2j}}{p_j}, \quad p_j = \sqrt{P_{1j}^2 + P_{2j}^2}, \\ P_{1j} &= \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \cos 2\tilde{\vartheta}_{i,j}, \quad P_{2j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sin 2\tilde{\vartheta}_{i,j}, \\ & \quad / j = \overline{1, l}. \end{aligned}$$

Дифференциальные уравнения (13) и (15) описывают изменение проекций суммарного дисбаланса в j -й плоскости коррекции.

Уравнения движения ротора с учетом АБ

Из работ [20, 21] следует:

- а) что уравнения, описывающие поступательное движение ротора с АБ, получаются прибавлением в левой части уравнения (1) вторых производных векторов суммарных дисбалансов – \mathbf{s}_j , $/j=\overline{1, l}/$:

$$m_r \ddot{\mathbf{r}} + \sum_{j=1}^l \ddot{\mathbf{s}}_j = \mathbf{R}^{(e)}, \quad (16)$$

где $\mathbf{s}_j = \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j} \mathbf{r}_{i,j} = (s_{j,x}, s_{j,y}, 0)^T$, $/j=\overline{1, l}/$ – вектор суммарного дисбаланса в j -й плоскости коррекции;

- б) уравнения, описывающие вращательное движение ротора, получаются прибавлением в левой части уравнения (2) моментов от вторых производных векторов суммарных дисбалансов – \mathbf{s}_j , $/j=\overline{1, l}/$, относительно центра масс ротора:

$$\frac{d'}{dt} (\mathbf{L}_r)_{uvw} + \boldsymbol{\omega}_{uvw} \times (\mathbf{L}_r)_{uvw} + \sum_{j=1}^l \mathbf{d}_j \times \ddot{\mathbf{s}}_j = \mathbf{M}_G^{(e)}. \quad (17)$$

Уравнения движения ротора, помещенного в корпус с учетом АБ

Пусть ротор помещен с возможностью вращения в корпус. Масса корпуса и его тензор инерции относительно осей $Ouvw$ соответственно равны m_c и

$$\mathbf{J}_c = \begin{pmatrix} J_u^{(c)} & -J_{uv}^{(c)} & -J_{uw}^{(c)} \\ -J_{uv}^{(c)} & J_v^{(c)} & -J_{vw}^{(c)} \\ -J_{uw}^{(c)} & -J_{vw}^{(c)} & J_w^{(c)} \end{pmatrix}.$$

Из работ [20, 21] следует, что для ротора, помещенного в корпус с учетом АБ, уравнения поступательного движения можно получить из уравнения (16) путем замены массы ротора m_r массой условного составного ротора $M = m_r + m_c$:

$$M \ddot{\mathbf{r}} + \sum_{j=1}^l \ddot{\mathbf{s}}_j = \mathbf{R}^{(e)}; \quad (18)$$

уравнения вращательного движения можно получить из уравнения (17) путем замены вектора момента количества движения ротора $(\mathbf{L}_r)_{uvw} = \mathbf{J}_r(\boldsymbol{\omega}_r)_{uvw}$

вектором момента количества движения условного составного ротора $(\mathbf{L}_r^{(s)})_{uvw} = \mathbf{J}_r^{(s)}(\boldsymbol{\omega}_r)_{uvw}$:

$$\frac{d'}{dt} (\mathbf{L}_r^{(s)})_{uvw} + \boldsymbol{\omega}_{uvw} \times (\mathbf{L}_r^{(s)})_{uvw} + \sum_{j=1}^l \mathbf{d}_j \times \ddot{\mathbf{s}}_j = \mathbf{M}_G^{(e)}, \quad (19)$$

где $\mathbf{J}_r^{(s)} = \begin{pmatrix} A_r + J_v^{(c)} & -J_{uv}^{(c)} & 0 \\ -J_{uv}^{(c)} & A_r + J_u^{(c)} & 0 \\ 0 & 0 & C_r \end{pmatrix}$ – тензор инерции условного составного ротора.

Проверка вида дифференциальных уравнений движения ротора, помещенного в корпус, с АБ с использованием общих теорем динамики

Уравнение (18) также может быть получено из теоремы о движении центра масс механической системы, а уравнение (19) (с точностью до величин первого порядка малости включительно) – из теоремы об изменении момента количества движения механической системы.

Проиллюстрируем вывод уравнения (18). Теорема о движении центра масс в нашем случае имеет вид

$$m_\Sigma \frac{d^2 \boldsymbol{\rho}_\Sigma}{dt^2} = \mathbf{R}^{(e)}, \quad (20)$$

где $m_\Sigma = M + \sum_{j=1}^l \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j}$ – масса роторной машины;

$\boldsymbol{\rho}_\Sigma = \frac{\boldsymbol{\rho}_r M + \sum_{j=1}^l \mathbf{s}_j + \sum_{j=1}^l \mathbf{d}_j \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j}}{m_\Sigma}$ – радиус-вектор центра масс роторной машины; $\mathbf{d}_j = (0, 0, z_j)^T$, $/j=\overline{1, l}/$ – радиус-векторы точек подвеса АБ.

Тогда

$$\begin{aligned} m_\Sigma \ddot{\boldsymbol{\rho}}_\Sigma &= \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\boldsymbol{\rho}_r M + \sum_{j=1}^l \mathbf{s}_j + \sum_{j=1}^l \mathbf{d}_j \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j}}{m_\Sigma} \right) = \\ &= M \ddot{\boldsymbol{\rho}} + \sum_{j=1}^l \ddot{\mathbf{s}}_j + \sum_{j=1}^l \ddot{\mathbf{d}}_j \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j}. \end{aligned} \quad (21)$$

Так как

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{d}}_j &= \frac{d}{dt} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{d}_j \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{d'}{dt} \mathbf{d}_j + \boldsymbol{\omega}_{uvw} \times \mathbf{d}_j \right) = \\ &= \frac{d}{dt} (\boldsymbol{\omega}_{uvw} \times \mathbf{d}_j) = \\ &= \frac{d'}{dt} (\boldsymbol{\omega}_{uvw} \times \mathbf{d}_j) + \boldsymbol{\omega}_{uvw} \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{uvw} \times \mathbf{d}_j = \\ &= \frac{d'}{dt} (\boldsymbol{\omega}_{uvw} \times \mathbf{d}_j) = \frac{d'}{dt} [z_j(\dot{\beta}; -\dot{\alpha}; 0)^T] = \\ &= z_j(\ddot{\beta}, -\ddot{\alpha}, 0)^T, \quad / j = \overline{1, l}, \end{aligned}$$

то координаты векторов $\ddot{\mathbf{d}}_j$ и $\sum_{j=1}^l \ddot{\mathbf{d}}_j \sum_{i=0}^{n_j} m_{i,j}$, $/j=\overline{1, l}/$ являются величинами соответственно 1-го и 2-го порядка малости. Поэтому с точностью до величин первого порядка малости включительно уравнение (21) равносильно уравнению

$$m_\Sigma \ddot{\boldsymbol{\rho}}_\Sigma \approx M \ddot{\boldsymbol{\rho}} + \sum_{j=1}^l \ddot{\mathbf{s}}_j. \quad (22)$$

Пример

Описание физико-математической модели. Осесимметричный ротор помещен в корпус с возможностью вращения вокруг своей продольной оси с постоянной угловой скоростью ω (рис. 4). Корпус удерживают одна продольная упруго-вязкая опора и по четыре упругих и вязких поперечных опор. Свойства опор характеризуют коэффициенты жесткости ($k_{Lx}, k_{Ly}, k_{Lz}, k_{Rx}, k_{Ry}$) и вязкости ($b_{Lx}, b_{Ly}, b_{Lz}, b_{Rx}, b_{Ry}$).

В плоскостях $P_j (z=z_j, |z_j|=d_j), /j=1,2/$ находятся статические дисбалансы m_{0j} , находящимися на расстоянии r_{0j} от продольной оси ротора. В этих же плоскостях установлены АБ. Ось направлена в сторону начального направления вектора статического дисбаланса s_{01} . В исходном положении роторной машины оси $Oxyz, G\xi\eta\zeta, Guvw$ совпадают.

Дифференциальные уравнения движения составного ротора при отсутствии АБ и дисбаланса. Уравнения движения (16), (17), описывающие движение уравновешенного составного ротора, для рассмотренной модели (при отсутствии АБ) имеют вид

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + b_x\dot{x} + k_x x + b_{x\beta}\dot{\beta} + k_{x\beta}\beta &= 0, \\ M\ddot{y} + b_y\dot{y} + k_y y - b_{y\alpha}\dot{\alpha} - k_{y\alpha}\alpha &= 0, \\ A\ddot{\alpha} + b_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha\alpha + J_{uv}^{(c)}\ddot{\beta} + C_r\omega\dot{\beta} - b_{y\alpha}\dot{y} - k_{y\alpha}y &= 0, \\ -J_{uv}^{(c)}\ddot{\alpha} - C_r\omega\dot{\alpha} + B\ddot{\beta} + b_\beta\dot{\beta} + k_\beta\beta + b_{x\beta}\dot{x} + k_{x\beta}x &= 0, \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} M &= m_r + m_c, \quad A = A_r + J_v^{(c)}, \quad B = A_r + J_u^{(c)}; \\ k_x &= k_{Lx} + k_{Rx}, \quad k_y = k_{Ly} + k_{Ry}, \quad k_z = k_{Lz}, \\ k_\alpha &= k_{Ly}z_{kL}^2 + k_{Ry}z_{kR}^2, \quad k_\beta = k_{Lx}z_{kL}^2 + k_{Rx}z_{kR}^2, \\ k_{x\beta} &= k_{Lx}z_{kL} + k_{Rx}z_{kR}, \quad k_{y\alpha} = k_{Ly}z_{kL} + k_{Ry}z_{kR}, \\ b_x &= b_{Lx} + b_{Rx}, \quad b_y = b_{Ly} + b_{Ry}, \quad b_z = b_{Lz}, \\ b_\alpha &= b_{Ly}z_{bL}^2 + b_{Ry}z_{bR}^2, \quad b_\beta = b_{Lx}z_{bL}^2 + b_{Rx}z_{bR}^2, \\ b_{x\beta} &= b_{Lx}z_{bL} + b_{Rx}z_{bR}, \quad b_{y\alpha} = b_{Ly}z_{bL} + b_{Ry}z_{bR}. \end{aligned}$$

Дифференциальные уравнения, описывающие движение составного ротора при наличии динамического дисбаланса и АБ. Уравнения движения роторной машины при наличии АБ можно получить из уравнений движения (24) прибавлением в левых частях или вторых производных от суммарных дисбалансов ротора и АБ в каждой плоскости коррекции, или моментов относительно центра масс ротора этих производных:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + b_x\dot{x} + k_x x + b_{x\beta}\dot{\beta} + k_{x\beta}\beta + \ddot{s}_{1x} + \ddot{s}_{2x} &= 0, \\ M\ddot{y} + b_y\dot{y} + k_y y - b_{y\alpha}\dot{\alpha} - k_{y\alpha}\alpha + \ddot{s}_{1y} + \ddot{s}_{2y} &= 0, \\ A\ddot{\alpha} + b_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha\alpha + J_{uv}^{(c)}\ddot{\beta} + C_r\omega\dot{\beta} - b_{y\alpha}\dot{y} - k_{y\alpha}y - z_1\ddot{s}_{1y} - z_2\ddot{s}_{2y} &= 0, \\ -J_{uv}^{(c)}\ddot{\alpha} - C_r\omega\dot{\alpha} + B\ddot{\beta} + b_\beta\dot{\beta} + k_\beta\beta + b_{x\beta}\dot{x} + k_{x\beta}x + z_1\ddot{s}_{1x} + z_2\ddot{s}_{2x} &= 0, \end{aligned} \quad (25)$$

где $s_{1,x}, s_{2,x}, s_{1,y}, s_{2,y}$ описаны в (14); z_1, z_2 – координаты точек подвеса.

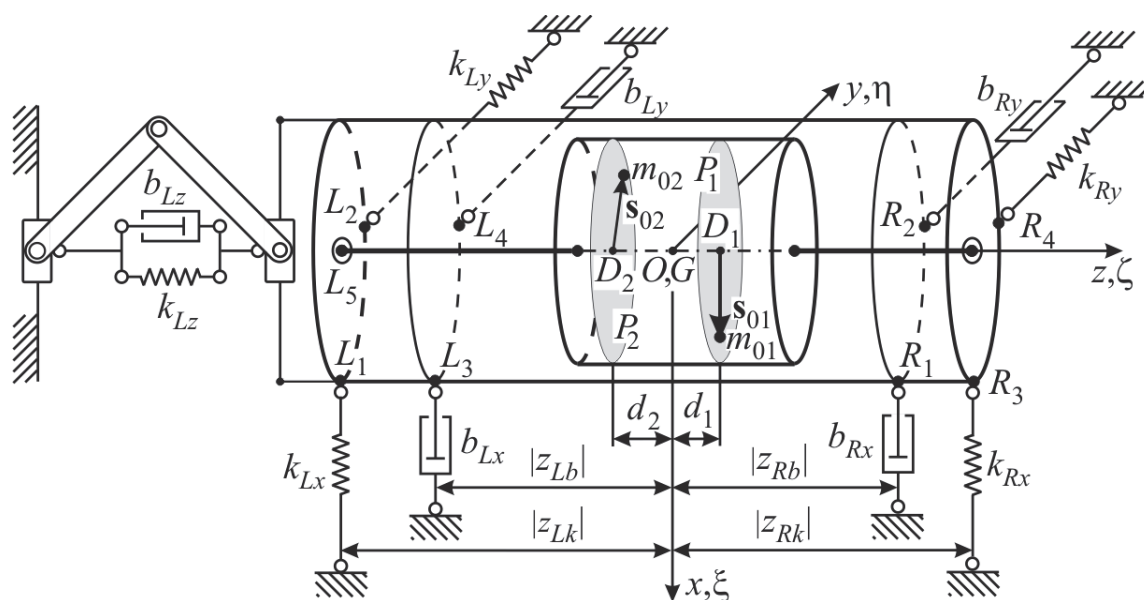


Рис. 4. Ротор с двумя АБ в корпусе, установленном на упруго-вязких опорах

Fig. 4. The rotor with two auto-balancers in a housing mounted on viscoelastic supports

Дифференциальные уравнения, описывающие изменение проекций суммарных дисбалансов АБ. Уравнения, замыкающие систему (25) относительно обобщенных координат $x, y, \alpha, \beta, s_{1,x}, s_{2,x}, s_{1,y}, s_{2,y}$, описывающих процесс автобалансировки, имеют вид (15), где $l=2$ и $a_{D,l,x} = \ddot{x} + z_j \ddot{\beta}$, $a_{D,l,y} = \ddot{y} + z_j \ddot{\alpha}$, $j = \overline{1, l}$.

Аналогично можно получать дифференциальные уравнения движения любой роторной машины с АБ, если для нее записаны уравнения движения без АБ.

Выводы

Для роторной машины с АБ со многими КГ в рамках приближенной теории, предназначенной для исследования переходных процессов при наступлении автобалансировки, установлено следующее:

1. Динамически роторная машина с АБ условно состоит из нескольких связанных частей – ротора (ротора с корпусом) и неуравновешенных АБ. Неуравновешенные АБ действуют на ротор силами, приложенными в точках подвеса АБ и равными вторым производным по времени от векторов суммарных дисбалансов. Ротор влияет на движение КГ в АБ силами, пропорциональными ускорениям точек подвеса АБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поршаков Б.П., Апостолов А.А., Никишин В.И. Газотурбинные установки. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 240 с.
2. Шайдак Б.П., Евдокимов В.Е., Степанов В.М., Архипов В.В., Даскал Ю.И. и др. Компрессорные машины и турбины АОТ «Невский завод». – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 2000. – 159 с.
3. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы. – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2003. – 196 с.
4. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. – М.: Наука, 2002. – 119 с.
5. Філімонович Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352 с.
6. Нестеренко В.П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1985. – 84 с.
7. Нестеренко В.П. Теория и практика устройств автоматической балансировки роторов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1990. – 34 с.
8. Sperling L., Merten F., Duckstein H. Self-synchronization and automatic balancing in rotor dynamics // Int. J. Rotating Machinery. – 2000. – V. 6. – № 4. – P. 275–285.
9. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Two-plane automatic balancing // Machine Dynamics Problems. – 2001. – V. 25. – № 3/4. – P. 139–152.
10. Simulation of two-plane automatic balancing of a rigid rotor / L. Sperling, B. Ryzhik, Ch. Linz, H. Duckstein // Mathematics and Computers in Simulation. – 2002. – V. 58. – № 4–6. – P. 351–365.
11. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-plane auto-balancing of rigid rotors // Technische Mechanik. – 2004. – V. 24. – № 1. – P. 1–24.
12. Green K., Champneys A.R., Lieven N.J. Bifurcation analysis of an automatic dynamic balancing mechanism for eccentric ro-

2. Дифференциальные уравнения, описывающие движение роторной машины с АБ, можно получить из уравнений движения роторной машины без АБ и дисбаланса прибавлением в них слагаемых, зависящих от вторых производных суммарных дисбалансов АБ и ротора и от положений точек подвеса АБ.
3. Если ротор установлен с возможностью вращения вокруг своей продольной оси в корпусе на податливых опорах, то ротор с корпусом образуют условный составной ротор, более массивный и вытянутый, чем сам ротор. При этом сразу составляются уравнения движения для этого составного ротора.
4. Дифференциальные уравнения, описывающие движение КГ в АБ, имеют стандартный вид. Особенность движения АБ учитывается ускорением его точки подвеса.
5. Дифференциальные уравнения, описывающие изменение суммарных дисбалансов, также имеют стандартный вид и получаются путем комбинирования уравнений движения КГ соответствующего АБ.

Сформулированные выводы применимы при любой кинематике движения ротора (ротора, помещенного в корпусе), любом количестве АБ, любом количестве КГ в АБ, для шаровых, роликовых и маятниковых АБ.

- tors // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – V. 291. – Iss. 3–5. – P. 861–881.
13. Філімонович І.І. Застосування функції Гамільтона до визначення умов зрівноваження автобалансирами ротора, здійснюючого просторовий рух // Збірник наукових праць КНТУ «Техніка в с/г виробн., галузеве машинобудування, автоматизація». – Кіровоград, 2007. – Вип. 18. – С. 34–41.
14. Automatic two-plane balancing for rigid rotors / D.J. Rodrigues, A.R. Champneys, M.I. Friswell, R.E. Wilson // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2008. – V. 43. – Iss. 6. – P. 527–541.
15. Lu Chung-Jen, Wang Ming-Cheng, Huang Shih-Hsuan. Analytical study of the stability of a two-ball automatic balancer // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – V. 23. – Iss. 3. – P. 884–896.
16. Bolton J.N. Single- and dual-plane automatic balancing of an elastically mounted cylindrical rotor with considerations of coulomb friction and gravity: diss. ... doct. of phil. in engin. mech. – Blacksburg, Virginia, 2010. – 317 p.
17. Two-plane automatic balancing: a symmetry breaking analysis / D.J. Rodrigues, A.R. Champneys, M.I. Friswell, R.E. Wilson // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2011. – V. 46. – Iss. 9. – P. 1139–1154.
18. Rezaee M., Fathi R. Improving the working performance of automatic ball balancer by modifying its mechanism // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – V. 358. – P. 375–391. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X15006604> (дата обращения: 29.08.2015).
19. Філімонович Г.Б., Гончаров В.В. Методика складання диференціальних рівнянь руху роторних систем з автобалансирами і її застосування до системи ротор – масивний корпус – автобалансиру // Збірник наукових праць КНТУ «Техніка в с/г виробн., галузеве машинобудування, автоматизація». – Кіровоград, 2009. – Вип. 22. – С. 357–363.
20. Филимонович Г.Б., Гончаров В.В. Уравновешивание автобалансиру ротора в упруго-вязко закрепленном корпусе с непо-

- движной точкой // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 2. – С. 71–77.
21. Филимоныхин Г.Б., Гончаров В.В. Уравновешивание автобаланси́ром ротора в упруго-вязко закрепленном корпусе, совершающем пространственное движение // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 41–49.
22. Горбенко А.Н. Об уравнениях движения ротора с автобаланси́ром в форме уравнений Лагранжа с множителями // Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий: сб. науч. тр. КГМТУ. – Керчь: КГМТУ, 2009. – Вып.10. – С. 39–46.
23. Горбенко А.Н. Общая структура уравнений движения роторных машин с автобаланси́ром пассивного типа // Авиационно-космическая техника и технология. Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов. – 2011. – № 8 (85). – С. 71–76.

Поступила 04.11.2015 г.

UDC 62–752+62–755

FORM AND STRUCTURE OF DIFFERENTIAL EQUATIONS OF MOTION AND PROCESS OF AUTO-BALANCING IN THE ROTOR MACHINE WITH AUTO-BALANCERS

Valeriy V. Goncharov,

Kirovograd National Technical University, 8, Universitetskiy Avenue, Kirovograd, 25006, Ukraine. E-mail: matkora@yandex.ru

Gennadiy B. Filimonikhin,

Kirovograd National Technical University, 8, Universitetskiy Avenue, Kirovograd, 25006, Ukraine. E-mail: filimonikhin@yandex.ua

The relevance of work is conditioned by a need of investigation of the process of equilibration by auto-balancers of rotating machines in equipment of the extraction and transportation facilities of geo-resources, particularly, in mine ventilators, in gas turbines for natural gas transportation.

The main aim of the study is to ascertain the structure and to specify the form of differential equations that describe the motion of a rotary machine with auto-balancers with many corrective weights and differential equations that describe the auto-balancing of rotor.

The methods used in the study: elements of theoretical mechanics, Lyapunov stability theory, theories of rotary machines.

The results. In the framework of a simplified theory of rotary machines with auto-balancers with many corrective weights the authors ascertained the structure and specified the form of systems of differential equations that describe the movement of a rotary machine and the process of balancing of the rotor by auto-balancers.

It was determined that the rotary machine conditionally consists of several interacting parts – a rotor (rotor in corps) and unbalanced auto-balancers. Unbalanced auto-balancers act on the rotor with the forces that apply to the point of suspension of auto-balancers and are equal to the second derivative by time of the vectors of the total imbalances. The rotor affects the movement of the corrective weights in auto-balancers by forces of moving space that are proportional to the acceleration of points of suspension of auto-balancers. The system of differential equations describing the motion of a rotary machine was drawn up with respect to the generalized coordinates of the machine. It is composed of two or more of the associated subsystems.

The first – describes the motion of the rotor. It can always be written relatively to the generalized coordinates that describe the motion of the rotor and total imbalances of the rotor and auto-balancer in each correction plane. Thus, if the rotor is mounted with rotation around its longitudinal axis in the corps which is held by pliant supports then the rotor and the corps form a conditioned composite rotor (more elongated and massive than the rotor) and the equations are made for it.

The number of other subsystems equals to the number of auto-balancers which counterbalance the rotor. Thus, the subsystem, corresponding to j -th auto-balancer, has a standard form and describes the motion of the corrective weights in this auto-balancer. It consists of n_j differential equations, where n_j – the number of corrective weights in j -th auto-balancer.

The system of differential equations that describes the process of auto-balancing of the rotary machine is compiled relatively of generalized coordinates of the rotor and of projections of the total imbalances of the rotor and auto-balancer in each correction plane. It is designed to investigate the stability of families of basic movements and the behavior of transients at auto-balancing. This system also consists of two or more of the associated subsystems. The first is obtained from the subsystem, describing the motion of the rotor if we write it relatively to the generalized coordinates of the rotor and total imbalances. The number of other subsystems also equals to the number of auto-balancers. Each of these subsystems has a standard form and consists of two equations that are obtained by combination of the equations of motion of corrective weights of corresponding auto-balancer.

Rules of composition of differential equations describing the motion of the rotary machine and the process of auto-balancing are formulated. They are applicable for any kinematics of the rotor motion (the rotor, placed in the corps); for any number of auto-balancers; for any number and different types of corrective weights in auto-balancer. The type of differential equations of the first subsystem is confirmed using the basic theorems of dynamics.

The formulated rules were applied to the rotary machine consisting of the rotor placed in the corps with the possibility to be rotated, which is held by pliant supports, and of two auto-balancers.

Key words:

Rotor machine, rotor, unbalance, auto-balancer, differential equations, auto-balancing, transients.

REFERENCES

1. Porshakov B.P., Apostolov A.A., Nikishin V.I. *Gazoturbinnye ustanovki* [Gas turbines]. Moscow, Publishing House of the «Oil and Gas» RSU of Oil and Gas I.M. Gubkin, 2003. 240 p.
2. Shaydak B.P., Evdokimov V.E., Stepanov V.M., Arkhipov V.V., Daskal Yu.I. et al. *Kompressornye mashiny i tyrbiny AOOT «Nevskiy zavod»* [The compressor machines and turbine OJSC «Nevsky Zavod»]. Moscow, TsNITEItyzhmash Publ., 2000. 159 p.
3. Ivanovskiy I.G. *Shakhtnye ventilyatory* [Mine ventilators]. Vladivostok, FESTU Press, 2003. 196 p.
4. Gusarov A.A. *Avtobalansiruyushchie ustroystva pryamogo deystviya* [Auto-balancing devices of direct action]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 119 p.
5. Filimonikhin G.B. *Zrивnovazhennyya i vibrozakhist rotoriv avtobalansiramy z tverdimi korigovalnimi vantazhami* [Balancing and vibration protection rotors auto-balancers solid corrective goods]. Kirovograd, KNTU Press, 2004. 352 p.
6. Nesterenko V.P. *Avtomaticheskaya balansirovka rotorov priborov i mashin so mnogimi stepenyami svobody* [Automatic rotor balancing devices and machines with many degrees of freedom]. Tomsk, Tomsk State Publ. house, 1985. 84 p.
7. Nesterenko V.P. *Teoriya i praktika ustroystv avtomaticheskoy balansirovki rotorov*. Avtoref. Dis. Dokt. nauk [Theory and practice of automatic balancing of rotors. Author's abstract Dr. Diss.]. Novosibirsk, 1990. 34 p.
8. Sperling L., Merten F., Duckstein H. Self-synchronization and automatic balancing in rotor dynamics. *Int. Rotating Machinery*, 2000, vol. 6, no. 4, pp. 275–285.
9. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Two-plane automatic balancing. *Machine Dynamics Problems*, 2001, vol. 25, no. 3/4, pp. 139–152.
10. Sperling L., Ryzhik B., Linz Ch., Duckstein H. Simulation of two-plane automatic balancing of a rigid rotor. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, vol. 58, no. 4–6, pp. 351–365.
11. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-plane auto-balancing of rigid rotors. *Technische Mechanik*, 2004, vol. 24, no. 1, pp. 1–24.
12. Green K., Champneys A.R., Lieven N.J. Bifurcation analysis of an automatic dynamic balancing mechanism for eccentric rotors. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 291, iss. 3–5, pp. 861–881.
13. Filimonikhina I.I. Zastosuvannya funktsii Gamiltona do viznachennya umov zrивnovazhennyya avtobalansiramy rotora, zdiysnyuyuchogo prostoroiv rukh [Application features of the Hamilton to determine the conditions of auto-balancing rotor weights, making spatial motion]. *Zbirnik naukovikh prats KNTU «Tekhnika v s/h vyrobnyts'tvi, haluseve mashynobudubannya, avtomatyzatsiya»*, Kirovograd, 2007, iss. 18, pp. 34–41.
14. Rodrigues D.J., Champneys A.R., Friswell M.I., Wilson R.E. Automatic two-plane balancing for rigid rotors. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2008, vol. 43, iss. 6, pp. 527–541.
15. Lu Chung-Jen, Wang Ming-Cheng, Huang Shih-Hsuan. Analytical study of the stability of a two-ball automatic balancer. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, iss. 3, pp. 884–896.
16. Bolton J.N. *Single- and dual-plane automatic balancing of an elastically mounted cylindrical rotor with considerations of coulomb friction and gravity*. Dr. Diss. Blacksburg, Virginia, 2010. 317 p.
17. Rodrigues D.J., Champneys A.R., Friswell M.I., Wilson R.E. Two-plane automatic balancing: a symmetry breaking analysis. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2011, vol. 46, iss. 9, pp. 1139–1154.
18. Rezaee M., Fathi R. Improving the working performance of automatic ball balancer by modifying its mechanism. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 358, pp. 375?391. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X15006604> (accessed 29 August 2015).
19. Filimonikhin G.B., Goncharov V.V. Metodika skladannya diferentsialnikh rivnyan' y rukhu rotornikh sistem z avtobalansirami i ii zastosuvannya do systemi rotor – masivniy korpus – avtobalansir [Method of differential equations of motion of rotor systems with auto-balance and its applications to the rotor system – a massive building – auto-balance]. *Zbirnik naukovikh prats KNTU «Tekhnika v s/h vyrobnyts'tvi, haluseve mashynobudubannya, avtomatyzatsiya»*, Kirovograd, 2009, no. 22, pp. 357–363.
20. Filimonikhin G.B., Goncharov V.V. Uravnovesivanie avtobalansirov rotora v uprugovyyazko zakreplennom korpusse s nepodvizhnoy tochko [Balancing auto balancer rotor in visco-elastic body fixed to a fixed point]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 2, pp. 71–77.
21. Filimonikhin G.B., Goncharov V.V. Uravnovesivanie avtobalansirov rotora v uprugovyyazko zakreplennom korpusse, sovershayushchem prostranstvennoe dvizhenie [Balancing auto balancer rotor in viscoelastic body fixed, making spatial motion]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 41–49.
22. Gorbenko A.N. Ob uravneniyakh dvizheniya rotora s avtobalansirov v forme uravneniy Lagranzha s mnozhitelyami [The equations of motion of the rotor with auto-balancer in the form of Lagrange equations with multipliers]. *Sbornik nauchnykh trudov KGMTU «Mekhanizatsiya proizvodstvennykh protsessov rybnogo khozyaystva, promyshlennykh i agrarnykh predpriyatiy»* [Proc. of KGMTU. Processes mechanization in fishing industry, production enterprises and agribusiness]. Kerch, KGMTU Press, 2009, iss. 10. pp. 39–46.
23. Gorbenko A.N. Obshchaya struktura uravneniy dvizheniya rotornykh mashin s avtobalansirov passivno tipa [The overall structure of the equations of motion of rotating machines with passive type auto-balancer]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Dvigateli i energoustanovki aerokosmicheskikh letatelnykh apparatov*, 2011, no. 8 (85), pp. 71–76.

Received: 4 November 2015.

УДК 504.55.054:622(470.6)

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ В ЦЕЛИКАХ ЗА СЧЕТ ПОДПОРА ТВЕРДЕЮЩИМИ СМЕСЯМИ

Голик Владимир Иванович,

д-р техн. наук, профессор кафедры технологии разработки месторождений
Северо-Кавказского государственного технологического университета,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: v.i.golik@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич,

д-р техн. наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, Ленина, 30. E-mail: krets@tpu.ru

Актуальность. В новых экономических условиях хозяйствования обостряется проблема качества разработки месторождений полезных ископаемых. Сохранность земной поверхности, уменьшение потерь руд и снижение объема разубоживающих пород может быть обеспечено путем заполнения выработанного пространства твердеющими смесями. Эта возможность ограничивается высокой стоимостью компонентов твердеющих смесей, которая может быть уменьшена использованием отходов горного производства. Желаемый эффект достигается при рациональном использовании свойств природных и искусственных массивов в процессе погашения выработанного пространства.

Цель исследования. Обоснование возможности уменьшения потерь в междукамерных целиках при регулировании напряжений в массиве путем подпора рудных целиков твердеющими смесями в процессе погашения камер закладкой твердеющими смесями. Цель достигается решением геомеханической задачи оценки напряжений в массиве в зависимости от состояния горных работ и механизма использования твердеющих смесей для регулирования напряжений.

Методы. Напряженное состояние массива в различных фазах его ослаблений очистными работами исследуется методом фотоупругости на моделях из оптически активного полиуретана с переменным коэффициентом бокового распора при сохранении остальных параметров модели.

Результаты. При сохранении определенного для данных условий уровня напряжений потери в рудных целиках между очистными камерами могут быть уменьшены за счет уменьшения размеров целиков на величину, зависящую от объемов выработанного пространства, физико-механических свойств руд и прочности твердеющих смесей. Подпор твердеющей закладкой снижает уровень напряжений в окрестностях очистных камер на определенную для данных условий величину, что комплексно улучшает экономические и экологические показатели подземной разработки месторождений, уменьшая потери в недрах.

Ключевые слова:

Месторождение, минеральное сырье, разработка, потери, разубоживание, твердеющая смесь, напряжения, целик, камера.

Введение

Будучи крупной сырьевой державой мира, Россия не преодолела опасности стать сырьевым придатком развитых стран, нередко экспортируя не рафинированные металлы, а сырую руду или продукцию ее первого передела. Некоторые российские металлургические комбинаты даже ввозят руду из-за высоких затрат на транспортировку российской руды, причем импорт сырья достигает половины экспорта.

По ряду видов минерального сырья: бокситы, цинк, хромовые и марганцевые руды, молибден, свинец и др., доля России в мировой добыче не превышает 3 %.

Низкая эффективность использования отечественной минерально-сырьевой базы и устаревшие технологии не позволяют решать проблемы полностью извлечения сырья из недр и комплексности его использования.

Универсальная природоохранная и ресурсосберегающая технология с закладкой пустот твердеющими смесями требует надежного обеспечения сырьем для их изготовления, потому что объем добычи сырья для закладочных смесей сравним с

объемом добычи руд, а добыча выводит из оборота землю.

Проблему сырья для приготовления смесей решают утилизацией отходов горного и смежных производств, например, хвостов обогащения [1], но этому препятствует наличие в хвостах обогащения металлов. Экспериментально доказана принципиальная возможность извлечения металлов из хвостов обогащения путем механохимической обработки в аппаратах с извлечением до 80 % металлов от остаточного содержания [2]. Привлекает внимание возможность использования хвостов не только в качестве инертных заполнителей смеси, но и вязущих компонентов.

Освоение технологий с заполнением пустот твердеющими смесями формирует проблемы, актуальность которых увеличивается с уменьшением запасов и содержания полезных компонентов месторождений и необходимостью увеличения объема добычи сырья с ростом населения Земли и увеличением потребности в металлах.

Критерий оптимальности деятельности горнорудного предприятия, который представляет собой совокупность показателей в процессе добычи и

переработки, сейчас больше всего зависит от качества добываемого сырья, определяемого корректностью обращения с сырьем [3].

В качестве объективных критериев полноты использования недр приняты потери и разубоживание руд, а в качестве результирующего – величина извлечения руды из недр.

Определение величины потерь по разности между балансовыми и извлеченными запасами допускает отклонения результатов расчета от фактической величины в 1,5–2 раза. Определение величины потерь непосредственным замером потерь по каждому источнику характеризуется меньшими ошибками.

Величина разубоживания оценивается по количеству руды или по содержанию металлов в запасах и в добытой руде.

Критерий оптимальности отработки месторождения – стоимость товарной продукции – определяется качеством добываемой руды, поэтому генеральным критерием целесообразности комбинированной разработки является показатель полноты использования недр.

Полнота использования недр, кроме общеизвестных факторов, определяется поведением рудовмещающих массивов под влиянием природных и техногенных напряжений. На практике это учитывается введением корректирующих коэффициентов влияния природных и техногенных факторов в рамках геолого-технологической модели [4]:

$$\sigma k_{\sigma} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f(x)(dx_1, dx_2 \dots dx_n) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f(x)(d\sigma_{\text{п}} + d\sigma_{\text{м}} + d\sigma_{\text{хпн}})k_k,$$

где σ – напряжения в зоне влияния выработок, МПа; k_{σ} – коэффициент корректировки напряжений путем учета геолого-структурных факторов; l_{\max} , l_{\min} – соответственно, максимальные и минимальные пролеты обнажения очистных выработок, м; $x_1 \dots x_n$ – технологические, физико-механические и иные характеристики процессов добычи; k_k – коэффициент корректировки взаимодействия открытого и подземного способа добычи руд во времени и пространстве.

Одним из основных направлений оптимизации горного производства является уменьшение объема руд, оставляемых в недрах, для управления состоянием рудовмещающего массива, что в конечном итоге определяет качественные показатели процесса добычи полезных ископаемых. Генеральным критерием оптимальности управления состоянием рудовмещающего массива становятся затраты на добычу руды с учетом ущерба от потерь и разубоживания.

Между показателями технологии добычи имеются коррелятивные связи. Так, для условий полиметаллического месторождения потери 1 % балансовой руды с содержанием металла 20 кг/т эквивалентны [5]:

- 5 % разубоживания по контуру блока с содержанием металла 10 кг/т;
- 17 % разубоживания руды за счет включений пород с содержанием 10 кг/т;
- 24 % снижения производительности труда на очистных работах;
- 18 % снижения производительности блока;
- 14 % снижения производительности труда.

Показатели технологий при прочих равных условиях определяются объемом использования твердеющих смесей. Снижение ущерба от потерь руды компенсирует увеличение затрат на закладку пустот твердеющими смесями.

Комплексная задача уменьшения потерь в целиках, сохранения земной поверхности и использования техногенных ресурсов решается методом моделирования.

Объекты и методы исследования

Подавляющее большинство металлических руд добывается в мощных месторождениях, например Курская магнитная аномалия. Их особенность определяется расположением богатейших запасов металлического сырья на пригодных для интенсивного сельского хозяйства землях с высокой плотностью населения [6]. Так, в регионе КМА более 70 % территории составляют плодородные черноземы.

Мощные месторождения играют важную роль в обеспечении минеральной безопасности России. Титульные руды содержат промышленные концентрации особо дефицитных в настоящее время редких и рассеянных металлов. Они разрабатываются с потерями, как правило, до 5–10 %, в зависимости от способа управления массивами. Исключением является извлечение запасов железистых кварцитов КМА с потерями до 60 %. Хвосты переработки металлических руд хранятся на поверхности, оказывая негативное влияние на окружающую среду.

Соседствующий с поземным способом открытый способ разработки месторождений твердых полезных ископаемых имеет в мировой практике горного дела доминирующее распространение, обеспечивая в сравнении с подземным способом более высокие показатели по производительности труда и мощности горных предприятий, меньшие сроки строительства и стоимость предприятий, а также ускоренную окупаемость капитальных вложений [7]. Считается общепризнанным, что меры, принимаемые по снижению негативного влияния открытых горных работ на окружающую среду: земную поверхность, атмосферу, водные источники, неэффективны, особенно в суровых климатических условиях [8].

Перспективным направлением считают извлечение запасов руд технологией скважинной гидродобычи с переводом в гидравлическую смесь и транспортированием по скважинам на поверхность. Технично-технологическая, экологическая и экономическая целесообразность комплексов по

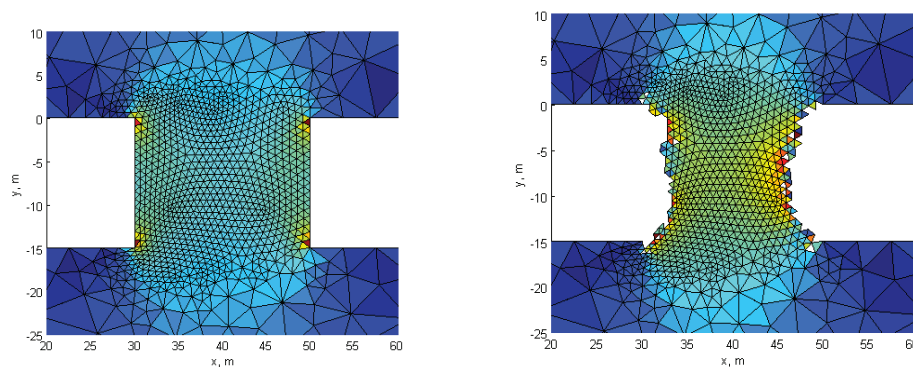


Рис. 1. Модель процесса разрушения междукамерного целика

Fig. 1. Interchamber pillar destruction model

скважинной гидродобыче полезных ископаемых и использованию образовавшихся подземных пустот для хранения жидких и газообразных углеводородов, а также захоронения отходов горнорудных производств в непроницаемых многолетнемерзлых массивах осадочных пород Сибири и Дальнего Востока не вызывает сомнений. Но создание искусственных полостей в густонаселенных регионах с активным использованием земель создает опасность [9].

Большинство мощных месторождений, эксплуатируемых подземным способом, обрабатывают камерными системами разработки. Добыча руды осуществляется под защитой предохранительной рудной потолочины, опирающейся на систему междукамерных целиков. Увеличение размеров очистных камер более допустимого для данных условий предела опасно разрушением целиков и массива (рис. 1).

В таких условиях закладка пустот твердеющими смесями, по сравнению с системой разработки с открытым выработанным пространством, позволяет эффективно регулировать величину технологических и природных напряжений в окрестностях очистных выработок, используя твердеющие смеси на основе хвостов обогащения.

При разработке мощных месторождений рассчитывают величину ущерба и оценивают степень снижения риска обрушения и проседания водозащитной толщи за счет закладки выработанных пространств камер отходами производства. В таких условиях определяют экономическую и природоохранную эффективность технологии с закладкой отработанных камер [10].

На Березниковских калийных рудниках применяют методику оценки устойчивости опорных целиков при камерной системе разработки, основанную на математическом моделировании напряженного состояния междукамерных целиков, позволяющую оценить динамику степени их нагружения и критерии обрушения [11].

Оценку зоны повреждения пород производят на основании измерений трещин в окрестности камеры, с определением контуров деформаций растяжения методом численного моделирования [12].

При работе на глубоких горизонтах Талнахского рудного узла осуществляют комплекс превентивных мер по разуплотнению тектонически напряженных зон до безопасного состояния путем образования разгрузочной щели или взрывания камуфлетных зарядов [13].

На Таштагольском месторождении дифференцируют технологии отработки камер без закладки и с закладкой выработанного пространства после оценки концентрации напряжений и неупругих деформаций в рудовмещающем массиве [14].

Содержание фракций в хвостах обогащения металлических руд различно, но частиц размером менее 0,1 мм насчитывается ориентировочно до 60 %. Коэффициент бокового распора закладки при увеличении влажности в интервале 10–30 % изменяется от 0,17 до 0,18. Наименьшее значение коэффициента бокового распора закладки наблюдается при полной водоотдаче, а наибольшее – на границе вода – твердая фракция.

Количество хвостов на складах предприятий намного превышает их потребности в сырье для твердеющих смесей. Так, на предприятиях КМА их накоплено 320 000 тыс. тонн. Выход отходов составляет около 5 тонн на 1 тонну руды в сухом весе.

Глубокая переработка хвостов обогащения с извлечением попутных ценных ингредиентов в рамках замкнутого производства может создавать прибыль, укрепить финансовое благополучие и предоставить средства на решение экологических проблем.

Практика заполнения подземных пустот хвостами обогащения после сгущения до 70 % твердого вещества по массе [15] не может быть корректной, поскольку при этом безвозвратно теряются попутные металлы стоимостью, сравнимой со стоимостью извлеченных металлов. Подземные выработки превращаются в реактор природного выщелачивания металлов с катастрофическими последствиями химического заражения.

Выход сырьевых горнодобывающих отраслей на более высокий технологический уровень возможен при конверсии технологий добычи руд на подземный способ с закладкой пустот твердеющими

смесями в камерном или слоевом варианте. Успех конверсии будет определяться полнотой учета геомеханических условий разработки.

При отработке месторождения подземным способом устойчивость массива определяется уровнем напряжений на контуре выработок. Структурные блоки пород ведут себя как элементы дискретной среды. При изменении главных напряжений угол их внутреннего трения изменяется с опасностью для устойчивости рудовмещающего массива.

Целью моделирования условий разработки является исследование величины напряжений в массиве для оценки влияния твердеющих смесей на динамику напряжений методом фотоупругости. Модели изготовлены из оптически активного материала типа полиуретан с ценой одной полосы 7,6 МПа для условий: глубина заложения выработки от дневной поверхности $H=350$ м, объемный вес пород $\gamma=3,0$ т/м³.

Условие прочности:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \geq \sin \delta (\sigma_1 + \sigma_2) + \sigma_{сж} + (1 - \sin \delta),$$

где σ_1, σ_2 – напряжения в точке контура; δ – угол внутреннего трения; $\sigma_{сж}$ – прочность породы, МПа.

Модель нагружается с коэффициентом бокового распора 0,5; 1,0; 1,5. Различные значения бокового распора учитывают позицию горного массива относительно зоны активности действующих в регионе геомеханических систем, например горных массивов, крупных хвостохранилищ или водоемов, что влияет на распределение горизонтальных напряжений. Они более высоки в гористой местности, например Тырныаузе.

Бока камер испытывают влияние естественных напряжений массива, особенно при соотношении высоты камеры к ее ширине, превышающем единицу (в модели принято соотношение 2).

На контуре выработки одно из главных напряжений, нормальное к контуру, равно нулю, а другое, касательное к контуру, оценивается количественно.

Напряжения измерены в проекции на вертикальную плоскость и вертикальном разрезе камеры.

Напряжение в натуре

$$G_n = \gamma H \frac{G_m}{\sigma_b},$$

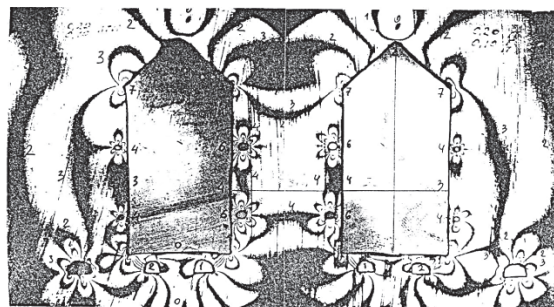
где γ – плотность руды и вмещающих пород, т/м³; H – глубина залегания точки от дневной поверхности, м; σ_b – создаваемое в модели напряжение.

Исследуется возможность уменьшения размеров междукамерного целика для условий:

- боковой распор 0,5; 1,0; 1,5;
- угол наклона главного силового вектора к вертикальной оси 0° при каждом значении бокового распора;
- очистные камеры без закладки и заполненные твердеющими смесями;
- модуль закладки $E=0,1$ МПа, вмещающих пород – 1,4 МПа.

Результаты и их обсуждение

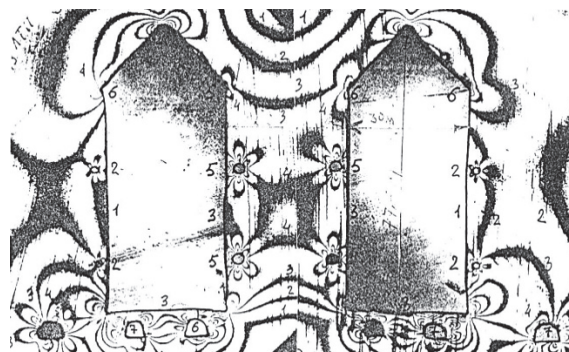
Максимальное напряжение зарегистрировано на контурах камеры и в замках сочленения камеры с потолочной (рис. 2).



a/a



b/b



в/с

Рис. 2. Эпюры напряжений в потолочине камеры в модели в зависимости от бокового давления: а) коэффициент 0,5; б) коэффициент 1,0; в) коэффициент 1,5; слева – открытая камера; справа – заложённая камера

Fig. 2. Stress sheets in an arch pillar of a chamber depending on lateral thrust: a) coefficient 0.5; b) coefficient 1.0; c) coefficient 1.5; on the left – open chamber; on the right – filled chamber

Проекция на вертикальную плоскость. При коэффициенте бокового распора $\lambda=0,5$ максимальные напряжения в замках свода и стенках камер составляют: $7,6 \times 7,5=57$ МПа, на вершине потолочины напряжения – $7,6 \times 2=15$ МПа, а в междукамерном целике (МКЦ) – $7,6 \times 6,5=49$ МПа. При коэффициенте бокового распора $\lambda=1,0$ максимальные напряжения в замках свода, потолочине

и стенках камеры $7,6 \times 6,5 = 49$ МПа. В МКЦ они снижаются и составляют: $7,6 \times 5,5 = 42$ МПа. При коэффициенте бокового распора $\lambda = 1,5$ в зонах замков свода, потолочины и стенках камеры напряжения составляют $7,6 \times 6,5 = 49$ МПа, а в своде потолочины они возросли до $7,6 \times 8,5 = 65$ МПа, почти в 3 раза по сравнению с вариантом при $\lambda = 0,5$ (рис. 3).

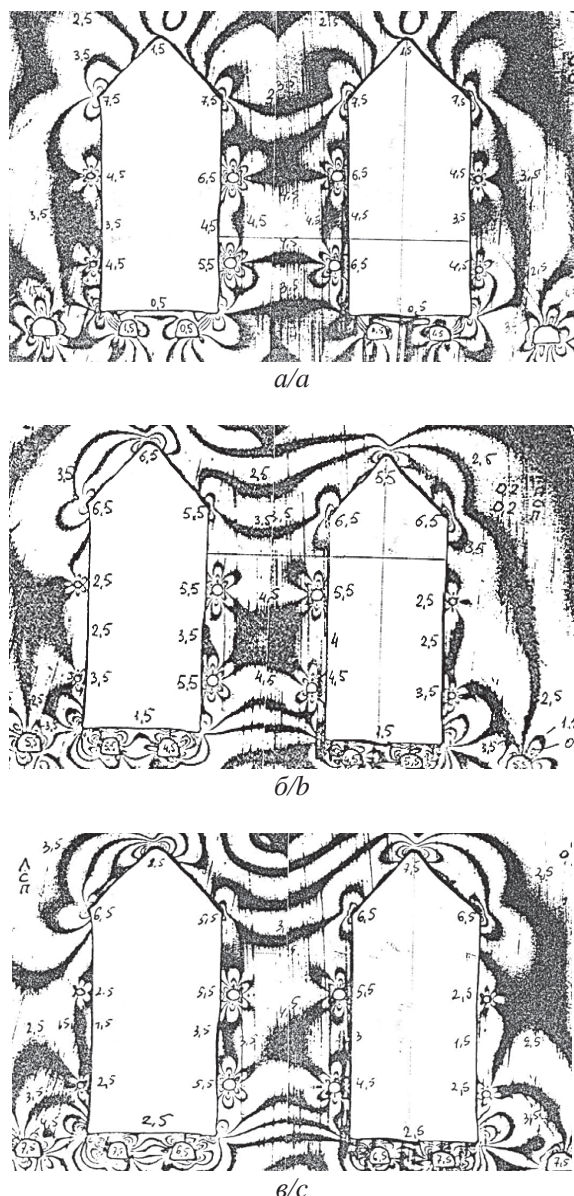


Рис. 3. Эпюры напряжений в боках камеры в модели в зависимости от бокового давления: а) коэффициент 0,5; б) коэффициент 1,0; в) коэффициент 1,5; слева – открытая камера; справа – заложённая камера

Fig. 3. Stress sheets in the sides of a chamber depending on lateral thrust: a) coefficient 0.5; b) coefficient 1.0; c) coefficient 1.5; on the left – open chamber; on the right – filled chamber

Вертикальный разрез камеры. Зонами максимальных напряжений являются свод потолочины и днище:

- при $\lambda = 0,5$ $75,6 \times 5,5 = 42$ МПа;
- при $\lambda = 1,0$ $75,6 \times 13,5 = 102$ МПа;
- при $\lambda = 1,5$ $75,6 \times 18,5 = 140$ МПа.

Максимальные напряжения активны при боковом распоре $\lambda = 1,5$.

Вывод по результатам моделирования: закладка камеры твердеющими смесями снижает напряжения в потолочине в 2 раза (таблица).

Таблица. Напряжения в элементах геомеханической системы, МПа

Table. Stress in the geomechanical system elements, MPa

Коэффициент распора Thrust coefficient	Открытое выработанное пространство Open mined-out space	Пространство заложено твердеющей смесью Space filled out with hardening mixture
Потолочина блока/Cap pillar of the panel		
0,5	3	2
1,0	7	5
1,5	13	9
Левый замок свода/Left arch keystone		
0,5	5	6
1,0	4	5
1,5	3	4
Правый замок свода/Right arch keystone		
0,5	5	5
1,0	5,5	6,5
1,5	6	8

Характер изменения показателей напряженности свидетельствует о том, что закладка пустот создает подпор стенкам, что позволяет уменьшить ширину целика на величину, зависящую от прочности твердеющей смеси. Заполнение камер прочной смесью при слоевых системах позволяет отрабатывать рудное поле без оставления целиков.

Для мощных рудных месторождений уменьшение запасов руд в целиках предоставляет возможность рудников без затрат на создание новых объектов инфраструктуры, сокращения изъятия земли и утилизации хвостов обогащения в составе твердеющих смесей [16]. Увеличение масштабов использования феномена упрочнения окажет влияние на экономику градообразующих горных предприятий [17].

В создании комплексного эффекта уменьшения потерь при добыче важную роль играет возможность использования малопрочных твердеющих смесей, поскольку они будут работать в условиях сниженных напряжений и играть вспомогательную роль [18].

Не менее важна возможность использования для целей управления массивом отходов первичной переработки металлосодержащего сырья после извлечения металлов одного из методов, получивших известность в последнее время [19].

Уменьшение объема извлекаемого на земную поверхность сырья при одновременном уменьшении уже накопленных отходов является един-

ственной возможностью реализации концепции гуманизации горного производства в глобальных масштабах [20].

Заключение

Предприятиям, разрабатывающим мощные месторождения подземным способом, предстоит увеличение объема производства. Реальным направлением решения этой проблемы является повышение полноты использования недр за счет снижения уровня потерь запасов в целиках. Условием реализации направления является сохранение бе-

зопасного уровня напряжений при увеличении объема выработанного пространства.

Надежным способом управления напряжениями является заполнение выработанного пространства твердеющими смесями, которые создают подпор целикам и повышают их несущую способность, позволяя уменьшить омертвленные запасы.

Твердеющие смеси могут быть в достаточном количестве изготовлены из хранящихся на земной поверхности хвостов обогащения после извлечения из них металлов до уровня санитарных требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолович Е.А., Шок И.А. Техногенные отходы в составе закладочных композиционных материалов // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 87–93.
2. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 321–324.
3. Ракишев Б.Р. Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 48–55.
4. Голик В.И., Полухин О.Н. Обоснование эколого-экономической эффективности утилизации хвостов обогащения руд КМА // Научные ведомости БелГУ. Естественные науки. – 2015. – № 9. – С. 176–186.
5. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 38–41.
6. Корнилов И.А., Колмыков С.Н., Петин А.Н. Оценка степени воздействия горнодобывающих предприятий КМА на гидроэкологическую ситуацию Белгородской области // Горный журнал. – 2012. – № 10. – С. 68–72.
7. Ильин С.А., Коваленко В.С., Пастихин Д.В. Открытый способ разработки месторождений: возможности и пути совершенствования // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 56–61.
8. Ильин С.А., Коваленко В.С., Пастихин Д.В. Преодоление начальных недостатков открытого способа разработки: опыт и результаты // Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 78–83.
9. Арнс В.Ж., Хчян Г.Х., Хрулёв А.С. Скважинная гидродобыча песков с хозяйственным использованием образовавшихся подземных пустот в условиях вечной мерзлоты // Горный журнал. – 2013. – № 10. – С. 46–52.
10. Борзаковский Б.А., Русаков М.И., Алыменко Д.Н. Оценка эффективности закладочных работ на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2012. – № 8. – С. 49–54.
11. Оценка устойчивости несущих элементов камерной системы разработки / С.Ю. Лобанов, А.Ю. Шумихина, И.С. Ломакин, В.Н. Токсаров, А.В. Евсеев // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 84–88.
12. Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования / В.Н. Лушников, М.П. Сэнди, В.А. Еременко, А.А. Коваленко, И.А. Иванов // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 89–94.
13. Галаев Р.Б., Звездин В.А., Шабаров А.Н. Геомеханическое обоснование безопасных способов разработки тектонически напряженных блоковых структур рудных залежей Талнахского узла // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 112–116.
14. Смирнов С.М., Татарников Б.Б., Александров А.Н. Влияние геодинамических условий отработки рудного участка на технологию очистных работ с закладкой выработанного пространства // ГИАБ. – 2014. – № 11. – С. 55–60.
15. Ресурсовоспроизводящие, экологически сбалансированные геотехнологии комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, В.К. Томаев, И.И. Помельников // Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 36–43.
16. Ястребинский М.А. Экономическое обоснование рыночного критерия приведенных затрат и результатов // ГИАБ. – 2014. – № 6. – С. 123–128.
17. Хашева З.М. Функциональное преобразование внутренней среды экономической системы региона // Региональная экономика: теория и практика. – 2013. – № 39. – С. 2–8.
18. Смирнов С.М., Татарников Б.Б., Александров А.Н. Влияние геодинамических условий отработки рудного участка на технологию очистных работ с закладкой выработанного пространства // ГИАБ. – 2014. – № 11. – С. 123–128.
19. Голик В.И., Комащенко В.И., Мorkун В.С. Современная практика выщелачивания металлов из отходов горного производства // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг: КНУ, 2015. – Вип. 39. – С. 3–8.
20. Комащенко В.И., Ерохин И.В. Концепция минимизации опасного загрязнения окружающей среды железорудных регионов КМА // Горный журнал. – 2014. – № 2. – С. 78–94.

Поступила 19.08.2015 г.

UDC 504.55.054:622(470.6)

POSSIBILITY JUSTIFICATION OF LOSSES REDUCTION IN PILLARS BY BACKWATERING WITH HARDENING MIXTURES

Vladimir I. Golik,

North-Caucasian State Technological University, 44, Nikolaev Street,
Vladikavkaz, 362021, Russia. E-mail: vigolik@mail.ru

Viktor G. Lukyanov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: krets@tpu.ru

The relevance of the research. The problem of mining field development quality is aggravating in new economic management conditions. The need to preserve the earth's surface, reduce ore losses and amount of diluting rocks can be ensured by filling out the space with hardening mixtures. This opportunity is limited by high-value components of hardening mixtures, which can be reduced by using mining waste. The desired effect is achieved by a rational use of properties of natural and man-made arrays.

Objectives of the study: to justify the possibility of losses reduction in interchamber pillars while regulating the stress in the array by means of ore pillars backwater with hardening mixtures. The objective is achieved by resolving a problem of geomechanical stress estimation in the array depending on the mining and use of hardening mixtures mechanism for stress regulation.

Methods used in the research. The stress state of the array in various phases of its weakening by sewage treatment works is studied with a photoelastic method on the models of optically active polyurethane with a variable coefficient of lateral thrust while maintaining the rest of the model parameters.

The results. The authors found that when the stress level is maintained ore pillar losses can be reduced by decreasing the size of pillars by an amount depending on the amount of developed space, physical and mechanical properties of ores and strength of hardening mixtures. Backwater with hardening mixtures reduces the stress level in the vicinity of the stopes by a certain value that comprehensively improves the economic and environmental performance of underground mining, reducing losses in the interior of the earth.

Key words:

Mine, mineral stock, development, losses, dilution, hardening mixture, stress, pillar, chamber.

REFERENCES

1. Ermolovich E.A., Shok I.A. Tekhnogennyye otkhody v sostave zakladochnykh kompozitsionnykh materialov [Technogenic waste as a part of stowage composite materials]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 9, pp. 87–93.
2. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 4, pp. 321–324.
3. Rakishev B.R. Kompleksnoe ispolzovanie rudy na predpriyatiyakh tsvetnoy metallurgii Kazakhstana [Complex use of ore at the enterprises of nonferrous metallurgy of Kazakhstan]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 7, pp. 48–55.
4. Golik V.I., Polukhin O.N. Obosnovanie ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti utilizatsii khvostov obogashcheniya rud KMA [Justification of ecologo-economic efficiency of utilization of tails of enrichment of KMA ores]. *Scientific sheets of BelGU. Natural sciences*, 2015, no. 9, pp. 176–186.
5. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 3, pp. 38–41.
6. Kornilov I.A., Kalmykov S.N., Petin A.N. Otsenka stepeni vozdeystviya gornodobyvayushchikh predpiyatiy KMA na gidroekologicheskuyu situatsiyu Belgorodskoy oblasti [Evaluation of extent of impact of the KMA mining enterprises on a hydroecological situation of the Belgorod region]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 10, pp. 68–72.
7. Ilin S.A., Kovalenko V.S., Pastikhin D.V. Otkrytyy sposob razrabotki mestorozhdeniy: vozmozhnosti i puti sovershenstvovaniya [Open way of development of fields: opportunities and ways of improvement]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 2, pp. 56–61.
8. Ilin S.A., Kovalenko V.S., Pastikhin D.V. Preodolenie iznachalnykh nedostatkov otkrytogo sposoba razrabotki: opyt i rezultaty [Overcoming of initial shortcomings of an open way of development: experience and results]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 4, pp. 78–83.
9. Arens V.Zh., Khcheyan G.Kh., Khrulev A.S. Skvazhinnaya gidrodobycha peskov s khozyaystvennym ispolzovaniem obrazovavshikhsya podzemnykh pustot v usloviyakh vechnoy merzloty [Borehole hydroproduction of sand with economic use of the formed underground emptiness in the conditions of permafrost]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 10, pp. 46–52.
10. Borzakovskiy B.A., Rusakov V.I., Alymenko D.N. Otsenka effektivnosti zakladochnykh rabot na rudnikakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley [Estimation of efficiency of stowage works on mines of the Verkhnekamsky field of potash salts]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 8, pp. 49–54.
11. Lobanov S.Yu., Shumikhina A.Yu., Lomakin I.S., Toksarov V.N., Evseev A.V. Otsenka ustoychivosti nesushchikh elementov kamernoy sistemy razrabotki [Estimation of stability of the bearing elements of chamber system of development]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 84–88.
12. Lushnikov V.N., Sendi M.P., Eremenko V.A., Kovalenko A.A., Ivanov I.A. Metodika opredeleniya zony rasprostraneniya povrezhdeniya porodnogo massiva vokrug gornykh vyrabotok i kamer s pomoshchyu chislennogo modelirovaniya [Way of definition of a zone of distribution of damage of the rock mass near excavations and chambers by means of numerical modeling]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 12, pp. 89–94.
13. Galaov R.B., Zvezdkin V.A., Shabarov A.N. Geomekhanicheskoe obosnovanie bezopasnykh sposobov razrabotki tektonicheskii napryazhennykh blokovykh struktur rudnykh zalezhey Talnakhskogo uzla [Geomechanical justification of safe ways of development of tectonic intense block structures of ore deposits of Talnakhsky knot]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 12, pp. 112–116.
14. Smirnov S.M., Tatarnikov B.B., Aleksandrov A.N. Vliyaniye geodinamicheskikh usloviy otrabotki rudnogo uchstka na tekhnologiyu ochistnykh rabot s zakladkoy vyrabotannogo prostanstva [Influence of geodynamic conditions of working off of an ore site on technology of clearing works with a laying of the developed space]. *GIAB*, 2014, no. 11, pp. 55–60.

15. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Tomaev V.K., Pomelnikov I.I. Resursovoproizvodyashchie, ekologicheski sbalansirovannye geotekhnologii kompleksnogo osvoeniya mestorozhdeniy Kurskoy magnitnoy anomalii [Resource-productive, ecologically balanced geotechnologies of complex development of fields of Kursk magnetic anomaly]. *Gornyy zhurnal*, 2014, no. 8, pp. 36–43.
16. Yastrebinskiy M.A. Ekonomicheskoe obosnovanie rynochnogo kriteriya privedennykh zatrat i rezultatov [An economic justification of market criterion of the given expenses and results]. *GIAB*, 2014, no. 6, pp. 123–128.
17. Hasheva Z.M. Funktsionalnoe preobrazovanie vnutrenney sredy ekonomicheskoy sistemy regiona [Functional transformation of the internal environment of economic system of the region]. *Regionalnaya ekonomika: teoriya i praktika*, 2013, no. 39, pp. 2–8.
18. Smirnov S.M., Tatarnikov B.B., Aleksandrov A.N. Vliyaniye geodinamicheskikh usloviy otrabotki rudnogo uchastka na tekhnologiyu ochistnykh rabot s zakladkoy vyrabotannogo prostranstva [Influence of geodynamic conditions of working off of an ore site on technology of clearing works with a laying of the developed space]. *GIAB*, 2014, no. 11, pp. 123–128.
19. Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V.S. Sovremennaya praktika vyshchelachivaniya metallov iz otkhodov gornogo proizvodstva [Modern practice of leaching of metals from waste of mining]. *Visnik Krivorizkogo natsionalnogo universiteta*, 2015, iss. 39, pp. 3–8.
20. Komashchenko V.I., Erokhin I.V. Kontseptsiya minimizatsii opasnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy zhelezorudnykh regionov KMA [Concept of minimization of dangerous environmental pollution of iron ore regions of KMA]. *Gornyy zhurnal*, 2014, no. 2, pp. 78–94.

Received: 19 August 2015.

УДК 62-61; 662.61

ГОРЕНИЕ СМЕСИ МЕТАН-КИСЛОРОД В СРЕДЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Прибатурин Николай Алексеевич,

доктор технических наук, главный научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. E-mail: pribaturin@itp.nsc.ru

Мильман Олег Ошеревич,

доктор технических наук, директор по науке ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»», Россия, 248010, г. Калуга, ул. Комсомольская Роща, 43. E-mail: turbocon@kaluga.ru

Богомолов Александр Романович,

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. E-mail: barom@kuzstu.ru

Шевырев Сергей Александрович,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. E-mail: ssa.pmahp@kuzstu.ru

Азиханов Сергей Сейфудинович,

кандидат технических наук, доцент кафедры энергоресурсосберегающих процессов в химической и нефтегазовой технологиях Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. E-mail: azihanov@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания высокоэффективных энергоблоков по одному из направлений, предусматривающему разработку конструкции пароперегревателя и технологии перегрева водяного пара до температур выше 800 °С сверхкритического давления перед непосредственным вводом пара в турбоустановку.

Цель работы. Исследование влияния соотношения расходных энтальпийных характеристик горючей смеси (CH_4+O_2) по составу, близкому к стехиометрии, и слабо перегретого водяного пара атмосферного давления на температуру реагирующих сред (продуктов сгорания в среде водяного пара), а также на качественный и количественный состав парогазовой смеси в диапазоне расходных характеристик стабильного и устойчивого горения.

Методы исследования. В работе используются отработанные методики измерений всех параметров процесса в автоматизированном режиме сбора и обработки первичной информации: температуры, давления, расхода, состава газовой конденсированной фазы. Применяется проточный метод измерения концентрации продуктовых компонентов в режиме реального времени с погрешностью $\pm 5\%$.

Результаты. Выявлено, что с повышением численного значения отношения горючей смеси к спутно подаваемому водяному пару происходит постепенное повышение роли реакции неполного окисления метана. Также имеется область, где будет происходить доминирующее влияние реакции полного окисления метана при незначительной паровой конверсии метана. Это обстоятельство может свидетельствовать об уменьшении доли водорода в продуктах горения на выходе из пароперегревателя (камеры сгорания). Термодинамический анализ горения метана и кислорода в среде водяного пара необходимо проводить с учетом возможного влияния процесса паровой конверсии метана в широком интервале температур, но в большей степени при температуре более 700 °С. Паровая конверсия метана имеет место не только в непосредственной области смешения водяного пара на границе поверхности факела с продуктами сгорания, но и за фронтом пламени в объеме камеры сгорания.

Ключевые слова:

Метан-кислородная смесь, горение, водяной пар, паровая конверсия метана, теплоэлектростанция.

Введение

Современные теплоэлектростанции (ТЭС), работающие при сверхкритических и ультрасверхкритических параметрах пара, являются одним из наиболее перспективных направлений исследования, проектирования и строительства в области энерге-

тического оборудования [1]. Это связано с тем, что такие ТЭС позволят существенно повысить КПД выработки электроэнергии, а вместе с этим и существенно сократить загрязнение окружающей среды. В Евросоюзе планируется внедрить пылеугольные энергоблоки с КПД около 50 % [2, 3].

Повышение энергоэффективности и снижение экологической напряженности при выработке тепловой и электрической энергии можно обеспечить за счет водородного топлива [4–6], но высокая стоимость водорода и кислорода не позволяет достичь высоких экономических показателей при генерации электроэнергии с использованием не только паротурбинных, но и парогазовых установок на водородном топливе. Предложена технология производства электроэнергии [7, 8], когда сжигание дорогого водорода в среде водяного пара производят только для перегрева водяного пара после его генерации в традиционных котлах. Это позволяет повысить температуру пара на входе в турбину с 550 до 1700 °С. При этом образуется только водяной пар и сохраняются все преимущества конденсационного цикла. Анализ характеристик экологически чистого производства электроэнергии показал, что при использовании электроэнергии, производимой на гидроэлектростанции, с учетом затрат на получение жидкого водорода, его безопасного хранения и транспортировки до электростанции, электрический КПД последней не превысит 0,37, хотя благодаря совокупности технических решений обеспечивается высокоэффективное использование располагаемого теплоперепада [8].

Можно использовать дешевое газообразное топливо, при сжигании которого осуществляется высокотемпературный перегрев водяного пара, выходящего из котлов угольной генерации, при одновременном снижении вредных выбросов или подержании на прежнем уровне экологической обстановки. Поскольку природный газ в основном состоит из метана (более 98 %), то при его сжигании практически не образуются побочные продукты или их получается намного меньше, чем в случае с другими видами ископаемого топлива [9].

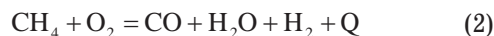
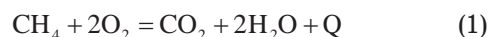
Технологии перегрева водяного пара при непосредственном использовании продуктов сгорания метан-кислородной смеси в последнее время развиваются достаточно активно [10].

В создании высокоэффективных энергоблоков можно выделить два направления:

- 1) разработка конструкционных материалов паровых котлов и турбин, выдерживающих давление до 37,5 МПа и температуру до 800 °С и выше [11];
- 2) технология перегрева пара до требуемых параметров вне паровых котлов.

Первое направление в настоящее время достаточно успешно развивается, при этом уже существуют материалы, позволяющие выдерживать требуемые параметры при высокой надежности работы энергоустановок. В настоящее время стоимость этих материалов высока.

Второе направление также развивается достаточно активно. Одним из перспективных направлений в технологиях перегрева водяного пара можно считать способ перегрева пара продуктами сгорания горючей смеси $\text{CH}_4 + \text{O}_2$:



Кроме перечисленных основных реакций в вышеуказанных условиях этого процесса H_2O может вступать во взаимодействие с образующимся CO (паровая конверсия CO) [12]. При анализе литературных данных было установлено, что в основном работы проводятся при использовании смеси метан-воздух в присутствии микрокапель воды и тумана [13]. В литературе представлены работы по исследованию пламен при сжигании метан-кислородной смеси в среде водяного пара [14], при этом отсутствуют работы по сжиганию метан-кислородной смеси в среде слабо перегретого водяного пара с исследованием компонентных и количественных характеристик продуктов недожога.

Экспериментальные и теоретические исследования, например [15–18], говорят о сложности протекающих при этом химических и диффузионных процессов, что не позволяет пока создать отчетливых представлений об истинном кинетическом механизме протекания реакций. Механизм вырожденного разветвления элементарных реакций окисления метана нельзя считать установленным однозначно, так как он не в состоянии объяснить все многообразие наблюдавшихся фактов высокотемпературного окисления метана [19].

Экспериментальные исследования

Задача исследования – отработка устойчивого режима горения метан-кислородной смеси в водяном паре атмосферного давления и температурой до 150 °С.

Экспериментальные исследования по горению горючей смеси были проведены в камере сгорания (пароперегревателе), конструкция которой представлена на рис. 1. Камера сгорания выполнена из нержавеющей стали, внутри которой в спутном потоке движутся перегретый водяной пар и продукты сгорания метан-кислородной смеси, состав которой близок к стехиометрическому.

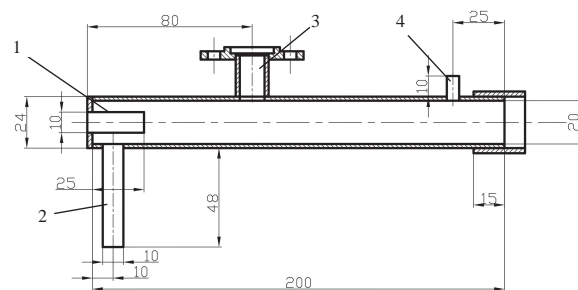


Рис. 1. Пароперегреватель: 1 – штуцер для ввода горючей смеси; 2 – штуцер для ввода низкоэнтальпийного перегретого водяного пара; 3 – смотровое окно; 4 – штуцер для ввода термопары

Fig. 1. Steam superheater: 1 – combustible mixture inlet fitting; 2 – low enthalpy superheated steam inlet fitting; 3 – observation window; 4 – thermocouple inlet fitting

Горючая смесь в пароперегревателе подавалась через штуцер 1 с помощью специального горелочного устройства, имеющего форсунку с диаметром выходного отверстия 1,5 мм. Водяной пар в пароперегревателе поступал перпендикулярно штуцеру для ввода горючей смеси через штуцер 2. Такая конструкция позволяет охлаждать форсунку и обеспечивать стабильное горение. В пароперегревателе было предусмотрено смотровое окно, позволяющее визуально контролировать наличие горения метан-кислородной смеси в потоке перегретого водяного пара атмосферного давления. Контроль температуры парогазовой смеси на выходе из пароперегревателя осуществлялся хромель-алюмелевой термопарой (диапазон измеряемых температур – до 1273 К, погрешность измерения – не более 3 К). Схема экспериментальной установки приведена в [20].

В ходе проведения экспериментальных исследований контролировались и регистрировались следующие параметры:

- 1) температура низкотемпературного водяного пара с помощью хромель-копелевой термопары (диапазон измерений до 433 К, погрешность измерений не более 2,5 К);
- 2) давление метана и кислорода с помощью манометров (класс точности 2,5, предел измерения 0,6 и 2,5 МПа соответственно). В экспериментальных исследованиях избыточное давление в газовых магистралях для метана и кислорода поддерживалось в пределах 0,15–0,25 МПа;
- 3) температура метана и кислорода с помощью хромель-копелевой термопары (диапазон измерений до 433 К, погрешность измерений не более 2,5 К);
- 4) расход метана и кислорода с помощью газовых ротаметров типа РМ-02 (погрешность измерения не более 2,5 %, диапазон измерения 3,5 л/мин);
- 5) расход газовой смеси, образованной неконденсирующимися продуктами недожога горючей смеси, с помощью газового барабанного счетчика ГСБ-400 (предел измерения 0,02–0,06 м³/ч, относительная погрешность ±1 %) и перистальтического насоса Zalimp PP 1–05, подающего часть продуктов недожога горючей смеси в газоанализатор;
- 6) концентрация газовых компонентов CO, CH₄, O₂, CO₂, H₂ (диапазон измерения 50, 5, 21, 100, 100 % соответственно, погрешность измерения не более 5 %).

Приведенные выше параметры регистрировались с помощью аналогово-цифровой системы сбора и обработки результатов, реализованной на базе SCADA-системы SimpLight, специализированной программы для обработки измерений концентрации газов поточного газоанализатора ТЕСТ-1 и вторичных приборов компании «ОВЕН». Опыты проведены при значении коэффициента избытка окислителя (O₂), близком к 1.

В результате сжигания горючей смеси в водяном паре образуется парогазовая смесь, которая, прохо-

дя через конденсатор-сепаратор, поступала в поточный газоанализатор. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице.

Таблица. Параметры экспериментальных данных
Table. Experimental data parameters

Параметр / Характерный образ эксперимента Parameter / Description of the experiment	Опыт 1 / Experiment 1	Опыт 2 / Experiment 2	Опыт 3 / Experiment 3	Опыт 4 / Experiment 4
Температура парогазовой смеси на выходе из пароперегревателя, °С Temperature of the gas-steam mixture at the output from the steam superheater	555	500	485	480
Температура низкотемпературного перегретого водяного пара, °С Temperature of low enthalpy superheated steam, °С	142	142	142	142
Концентрация CO ₂ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. CO ₂ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	47	60	75	54
Концентрация CO в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. CO concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	10	6,7	2	8
Концентрация CH ₄ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. CH ₄ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	0	0	0	0
Концентрация O ₂ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. O ₂ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	0,7	0,3	1	0,2
Концентрация H ₂ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. H ₂ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	38	23	20	25
Коэффициент избытка окислителя (O ₂), α Excess oxidant ratio (O ₂), α	0,96	1,00	1,01	0,91

Зависимость состава газа от соотношения энтальпии газовой (горючей) смеси к энтальпии водяного пара представлена на рис. 2.

По результатам измерений установлено:

1. Полученные результаты свидетельствуют о постепенном повышении роли реакции (2) с повышением отношения $I_{g,s}/I_s$.
2. Существует область, где будет происходить доминирующее влияние реакции окисления метана (1) при незначительной паровой конверсии метана по реакции (3). Это уменьшит долю водорода в продуктах горения на выходе из пароперегревателя (камеры сгорания).
3. При термодинамическом анализе горения метан-кислородной смеси в среде водяного пара следует учитывать влияние процесса паровой конверсии метана, который протекает в широком интервале температур по реакции (3) [21].

Она происходит не только в непосредственной области смешения водяного пара на границе поверхности факела с продуктами сгорания метано-кислородной смеси, но и за фронтом пламени в объеме камеры сгорания. Необходимо исследовать условия горения горючей смеси в водяном паре с целью снижения содержания водорода.

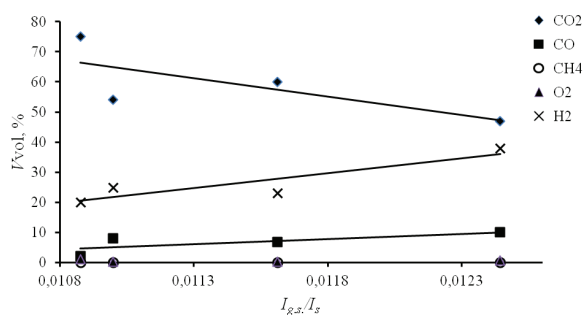


Рис. 2. Влияние отношения полного потока энthalпии газовой смеси ($I_{g,s}$) и полного потока энthalпии низкопотенциального водяного пара (I_s) на концентрации компонентов газовой смеси (V_{vol})

Fig. 2. Influence of the ratio of gas mixture enthalpy ($I_{g,s}$) and low-grade steam enthalpy (I_s) on the concentration of gas mixture components (V_{vol})

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Елисеев Ю.В., Ноздренко Г.В., Шепель В.С. Перспективные экологичные энергоблоки ТЭС на твердом топливе / VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива», Доклады // Институт теплофизики СО РАН, 12–16 ноября 2012. – Новосибирск, 2012. – С. 42.1–42.7.
- Разработка научно-технических решений по котлу для энергоблока на ультрасверхкритические параметры пара / Е.В. Сомова, А.Н. Тугов, А.Л. Шварц, Э.Х. Вербовецкий // Сборник материалов IX семинара вузов по теплофизике и энергетике. Т. II. – Казань, 2015. – С. 92–100.
- Zhang D. Introduction to advanced and ultra-supercritical fossil fuel power plants // Ultra-supercritical Coal Power Plants. – Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013. – P. 1–20.
- Федоров А.В., Мильман О.О., Шифрин Б.А. Высокоэффективные технологии производства электроэнергии с использованием органического и водородного топлива. – М.: Из-во МГТУ, 2007. – 155 с.
- Расчетно-экспериментальное обоснование создания угольно-водородной электростанции с высокотемпературными (850...1500 °C) паровыми турбинами / О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев, В.А. Федоров, О.О. Мильман // Труды РНКТ-5. Т. 1 – М.: Изд-во МЭИ, 2010. – С. 63–68.
- Мильман О.О., Прибатурин Н.А., Федоров В.А. Теплофизические проблемы создания комбинированных электрогенерирующих установок с турбинными энергоблоками // Труды РНКТ-4. Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – С. 258–262.
- Расчетно-экспериментальные исследования в области создания высокотемпературных паровых турбин / Б.А. Шифрин, Р.А. Токарь, О.О. Мильман, В.А. Федоров // Труды РНКТ-4. Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2014. – С. 266–269.
- Высокотемпературная паровая турбина: патент Рос. Федерация № 2311540; заявл. 31.01.2006; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33 – 5 с.
- Шварц А.Л., Брук Л.Г. Конверсия метана в технологические газы. – М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2012. – 32 с.
- Веткин А.В., Сурис А.Л., Литвинова О.А. Исследование характеристик процесса горения метано-водородных топлив // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 65–68.
- Wheeldon J.M., Shingledecker J.P. Materials for boilers operating under supercritical steam conditions // Ultra-supercritical coal power plants. – Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013. – P. 81–103.
- Крылов О.В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // Российский химический журнал. – 2000. – Т. XLIV. – № 1. – С. 19–33.
- Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: experimental and numerical analysis / T. Boushaki, Y. Dhue, L. Selle, B. Ferret, T. Poinsot // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – V. 37. – № 11. – P. 9412–9422.
- Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames / A.N. Mazas, B. Fiorina, D.A. Lacoste, T. Schuller // Combustion and Flame. – 2011. – V. 158. – P. 2428–2440.
- Experimental and numerical study on the transient behavior of partial oxidation of methane in a catalytic monolith / R. Schwiedernoch, S. Tischer, C. Correa, O. Deutschmann // Chemical Engineering Science. – 2003. – V. 58. – P. 633–642.
- The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion / Z. Chun, S. Yu, L. Guoyuan, C. Shiyang, H. Yizhuo, Z. Chuguagn // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 75. – P. 12–18.
- Gu X., Zang S.S., Ge B. Effect on flow field characteristics in methane–air non-premixed flame with steam addition // Exp. Fluids. – 2006. – V. 41. – P. 829–837.
- Cormier J.M., Rusu I. Syngas production via methane steam reforming with oxygen: plasma reactors versus chemical reactors // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2001. – V. 34. – P. 2798–2803.

Выводы

- Результаты проведенных экспериментальных исследований показали возможность перегрева низкотемпературного водяного пара атмосферного давления продуктами сгорания метан-кислородной смеси.
- Наличие достаточно большого количества водорода в газовой смеси, поступающей в газоанализатор, позволяет рассматривать наряду с процессом горения также и паровую конверсию метана.
- Конструкция пароперегревателя, расходные характеристики горючей смеси и пара при значении коэффициента избытка окислителя, близком к единице (стехиометрическая смесь), не позволяют получить парогазовую смесь, состоящую только из водяного пара и CO₂. В связи с этим требуется оптимизировать режимы горения метан-кислородной смеси, а также оценить возможность изменения конструкции пароперегревателя, горелочного устройства и способа ввода метана и кислорода в пароперегреватель.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России; уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57614X0049.

19. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – М.; Л.: Гос. энерг. изд-во, 1959. – 396 с.
20. Кирилов К.О., Азиханов С.С., Богомолов А.Р. Горение метан-кислородной смеси в среде водяного пара // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодежного форума. Т. I. – Томск, 2015. – С. 290–293.
21. Термодинамика паровой конверсии метана / Р.А. Махмутов и др. // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 137–139.

Поступила 20.11.2015 г.

UDC 62–61; 662.61

BURNING OF METHANE-OXYGEN MIXTURE IN THE ENVIRONMENT OF OVERHEATED STEAM OF ATMOSPHERIC PRESSURE

Nikolay A. Pribaturin,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: pribaturin@itp.nsc.ru

Oleg O. Milman,

research-and-production enterprise on implantation Turbokon CJSC, 1, Komsomolskaya roshcha Street, Kaluga, 248010, Russia. E-mail: turbocon@kaluga.ru

Alexander R. Bogomolov,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: barom@kuzstu.ru

Sergey A. Shevyrev,

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: ssa.pmahp@kuzstu.ru

Sergey S. Azikhanov,

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: azikhanov@rambler.ru

The relevance of the research is caused by necessity of making highly effective power-generating units on one of the directions, providing working out of a construction of the steam superheater and production engineering of steam overheat up to temperatures above 800 °C of the supercritical pressure before the immediate steam feeding into a turbine.

The operation purpose: examination of the influence of enthalpic metering characteristics of a gas mixture (CH_4+O_2) close to stoichiometric composition, and feebly overheated steam of atmospheric pressure on the temperature of the reacting medium (products of combustion in the environment of steam), and also on qualitative and quantitative composition of a steam-gaseous intermixture over the range of metering characteristics of stable and resistant to burning.

Research techniques. The authors used proved measurement techniques of all parameters of process in the automated mode of gathering and processing of the primary information: temperature, pressure, charge, composition of a gas condensed phase. The flowing method of concentration measuring of products in real time mode with a margin error $\pm 5\%$ was also used.

The results. The authors revealed that the raise of a numerical value of the relation of a gas mixture to directionally submitted steam leads to a gradual raise of the response of partial oxidation of methane. There is a field where there will be a dominating agency of response of full methane oxidizing at insignificant steam conversion of methane according to the reaction. This proves hydrogen share diminution in combustion gases out of the steam superheater (combustion chamber). The thermodynamic analysis of methane and oxygen burning in the environment of steam should be carried out taking into account possible agency of steam conversion of methane over a wide temperature range, but mostly at temperature more than 700 °C. Methane steam conversion happens not only in the field of steam mixture on surface boundary line of a torch with products of combustion, but also behind the flame front in combustion chamber volume.

Key words:

Methane-oxygen mixture, burning, steam, steam conversion of methane, thermal power station.

The research was conducted with financial support from the Ministry of Education and Science of Russia; unique research identifier RFMEF157614X0049.

REFERENCES

1. Eliseev Yu.V., Nozdrenko G.V., Shepel V.S. Perspektivnye ekologichnye energobloki TES na tverdom toplive [Perspective ecological TPP with solid fuel]. *Doklady VIII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenie tverdogo topliva»* [Proc. 8th Russian conference with international participation. Solid fuel combustion]. Novosibirsk, 2012. pp. 42.1–42.7.
2. Somova E.V., Tugov A.N., Shvarts A.L., Verbovetskiy E.Kh. Razrabotka nauchno-tehnicheskikh resheniy po kotlu dlya energobloka na ultrasverkhkriticheskie parametry para [Development of science and technical decisions for boiler at power station with ultrasupercritical steam]. *Sbornik materialov dokladov IX seminaru vuzov po teplofizike i energetike* [Proc. 9th universities seminar in thermal physic and energy]. Kazan, 2015. pp. 92–100.
3. Zhang D. Introduction to advanced and ultra-supercritical fossil fuel power. *Ultra-Supercritical Coal Power Plants*. Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi, Woodhead Publishing Limited, 2013. pp. 1–20.
4. Fedorov A.V., Milman O.O., Shifrin B.A. *Vysokoeffektivnye tekhnologii proizvodstva elektroenergii s ispolzovaniem organicheskogo i vodorodnogo topliva* [Highly efficient technologies of electricity production with use of organic and hydrogen fuel]. Moscow, MGTU Press, 2007. 115 p.
5. Favorskiy O.N., Leontev A.I., Fedorov V.A., Milman O.O. Raschetno-eksperimentalnoe obosnovanie sozdaniya ugolno-vodorodnoy elektrostantsii s vysokotemperaturnymi (850–1500 °C) parovymi turbinami [Calculation-experimental substantiation of creation of coal-hydrogen electricity power station with high temperature steam turbine]. *Trudy RNKT-5* [Proc. 5th Russian national conference in heat transfer]. Moscow, MEI Press, 2010. pp. 63–68.
6. Milman O.O., Pribaturin N.A., Fedorov V.A. Teplofizicheskie problemy sozdaniya kombinirovannykh elektrogeneriruyushchikh ustanovok s turbinnymi energoblokami [Thermo physical problems of creation of combined electricity sets with turbine power unit]. *Trudy RNKT-4* [Proc. 4th Russian national conference in heat transfer]. Moscow, MEI Press, 2006. pp. 258–262.
7. Shifrin B.A., Tokar R.A., Milman O.O., Fedorov V.A. Raschetno-eksperimentalnye issledovaniya v oblasti sozdaniya vysokotemperaturnykh parovykh turbin [Calculation-experimental investigation in the field of creation of high temperature steam turbine]. *Trudy RNKT-4* [Proc. 4th Russian national conference in heat transfer]. Moscow, MEI Press, 2014. pp. 266–269.
8. Shifrin B.A., Milman O.O., Fedorov V.A. *Vysokotemperaturnaya parovaya turbina* [High temperature steam turbine]. Patent RF, no. 2006102804/06, 2007.
9. Shvarts A.L., Bruk L.G. *Konversiya metana v tekhnologicheskie gazy* [Conversion of methane into technological gases]. Moscow, MITKHT im. M.V. Lomonosova Press, 2012. 32 p.
10. Vetkin A.V., Suris A.L., Litvinova O.A. Issledovanie kharakteristik protsessa goreniya metano-vodorodnykh topliv [Investigation of combustion process of methane-hydrogen fuel]. *Teploenergetika*, 2015, no. 1, pp. 65–68.
11. Wheelodon J.M., Shingledecker J.M. *Materials for boilers operating under supercritical steam conditions. Ultra-supercritical coal power plants materials*. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, Woodhead Publishing Limited, 2013. pp. 81–103.
12. Krylov O.V. Uglekislotnaya konversiya metana v sintez-gas. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2000, vol. XLIV, no. 1, pp. 19–33.
13. Boushaki T., Dhué Y., Selle L., Ferret B., Poinot T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: experimental and numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, no. 11, pp. 9412–9422.
14. Mazas A.N., Fiorina B., Lacoste D.A., Schuller T. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames. *Combustion and Flame*, 2011, vol. 158, pp. 2428–2440.
15. Schwiedernoch R., Tischer S., Correa C., Deutschmann O. Experimental and numerical study on the transient behavior of partial oxidation of methane in a catalytic monolith. *Chemical Engineering Science*, 2003, vol. 58, pp. 633–642.
16. Chun Z., Yu S., Guoyuan L., Shiyang C., Yizhuo H., Chuguang Z. The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 75, pp. 12–18.
17. Gu X., Zang S.S., Ge B. Effect on flow field characteristics in methane–air non-premixed flame with steam addition. *Exp. Fluids*, 2006, vol. 41, pp. 829–837.
18. Cormier J.M., Rusu I. Syngas production via methane steam reforming with oxygen: plasma reactors versus chemical reactors. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, vol. 34, pp. 2798–2803.
19. Knorre G.F. *Topochnye protsessy* [Combustion processes]. Moscow, Leningrad, Gos. Energo. Publ., 1959. 396 p.
20. Kirilov K.O., Azikhanov S.S., Bogomolov A.R. Gorenie metan-kislородnoy smesi v srede vodyanogo para [Combustion of methane-oxygen mixture in water steam atmosphere]. *Trudy III Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma «Intellektualnye energosistemy»* [Proc. 3rd World Youth Forum. Smart energy systems]. Tomsk, 2015. pp. 290–293.
21. Makhmutov R.A. Termodinamika parovoy konversii metana [Thermodynamics of methane steam reforming]. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 137–139.

Received: 20 November 2015.

УДК 911.52

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПОЖАРООПАСНОСТИ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Синюткина Анна Алексеевна,

кандидат географических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3; ассистент кафедры географии Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, пр. Ленина, 36. E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Бурнашова Елена Николаевна,

научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3; аспирант кафедры экологической и сельскохозяйственной биотехнологии Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, пр. Ленина, 36. E-mail: lictgestalte@mail.ru

Беленко Алексей Александрович,

младший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3; аспирант кафедры географии Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, пр. Ленина, 36. E-mail: valenso77@mail.ru

Гашкова Людмила Павловна,

младший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3. E-mail: gashkova-lp@rambler.ru

Малолетко Антон Алексеевич,

научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3. E-mail: maloletko.anton@yandex.ru

Актуальность исследования определяется необходимостью оценки последствий осушительной мелиорации как фактора формирования потенциальной пожароопасности территории.

Цель исследования. Проведение оценки потенциальной пожароопасности типичных для Томской области осушенных болот.

Методы исследования. Определение потенциальной пожароопасности проведено с использованием балльной системы оценки факторов возникновения пожаров в пределах заболоченных территорий на основе данных полевых ландшафтных исследований, проведенных в 2014–2015 гг. Шкалы потенциальной пожароопасности построены на основе оценок пирогенных характеристик компонентов болотных геосистем (доминанты растительных ярусов, уровень болотных вод, тип торфа верхнего горизонта), а также степени антропогенной нагрузки на них. Потенциальная пожароопасность территории определена как сумма баллов по каждому критерию оценки.

Результаты. Проведенные исследования показали, что для рассмотренных болот характерен средний и высокий уровень потенциальной пожароопасности, что главным образом связано с низким уровнем болотных вод вследствие проведения осушительной мелиорации, доступностью болота для местного населения как места проведения охоты и сбора дикоросов. Наибольшая потенциальная пожароопасность характерна для верхового осушенного болота, что связано с горючестью и легкостью возгорания сосны, вересковых кустарничков, сфагновых мхов и верхового торфа. Таким образом, проведенные исследования позволили выявить наиболее пожароопасные территории и могут являться основой для прогнозирования рисков возникновения торфяных пожаров, а также для разработки рекомендаций по рациональному использованию и снижению пожароопасности антропогенно нарушенных болот Томской области.

Ключевые слова:

Природный пожар, осушительная мелиорация, система оценки, ландшафтные исследования, антропогенная нагрузка

Природные, в том числе и торфяные пожары, являются одним из самых распространенных и опасных природных рисков. Влияние торфяных пожаров выражается в деградации и уничтожении

растительности и торфа, ускорении биогеохимических циклов элементов [1]. Кроме того, пожары вызывают длительные задымления городов и сельских населенных пунктов, загрязняют атмосферу

токсичными продуктами горения торфа, являются причиной заболевания людей на территориях, значительно превосходящих площади возгорания [2]. Торфяные пожары способны сохраняться на протяжении длительного времени (от недели до нескольких лет), несмотря на интенсивные дожди и усилия по борьбе с ними [3].

Значительное увеличение пожарной активности в Западной Сибири со второй половины 20 в. связано с ростом городов и увеличением антропогенной нагрузки на болота, расположенные в их окрестностях [4]. Большой вклад в увеличение потенциальной пожароопасности территорий вносят антропогенно измененные болота, что является значимым для Томской области, где в 1970–1980 гг. были проведены масштабные работы по осушению болот для целей торфодобычи, гидроресомелиорации и сельского хозяйства. В настоящее время значительная часть осушенных болот фактически не используется, зарастает мелко-лесьем и кустарниками и при низком уровне болотных вод периодически подвергается торфяным пожарам. По данным Управления лесами, на территории Томской области в период с 2008 по 2011 г. произошло 19 торфяных пожаров разной степени интенсивности на общей площади около 40 га. Торфяные пожары были зафиксированы в наиболее заселенных и хозяйственно освоенных районах Томской области [5].

Значительный экологический и экономический ущерб, наносимый торфяными пожарами, определяет необходимость прогнозирования рисков их возникновения. Одним из путей решения задачи раннего предупреждения торфяных пожаров является создание математических моделей для прогнозирования возможных состояний лесоболотных ландшафтов с определением участков с наибольшей степенью пожароопасности [6]. Основой для составления подобного рода моделей должна являться оценка потенциальной пожароопасности территорий с применением комплексного подхода и использованием природно-территориальных комплексов как основных единиц оценки пожароопасности территории, что позволит проследить генетическую взаимосвязь и взаимозависимость природных компонентов и их пирологических характеристик [7–10].

Таким образом, целью исследования является проведение комплексной оценки потенциальной пожароопасности типичных для Томской области осушенных болот. В качестве объектов исследования выбраны следующие болота: низинное болото Короткино (Колпашевский район), низинное болото Суховское (Бакчарский район), верховое болото Усть-Бакчарское (Чаинский район).

Материалы и методы исследования

Оценка современной потенциальной пожароопасности осушенных болот проведена на основе данных полевых ландшафтных исследований, прове-

денных в 2014–2015 гг.; оценка потенциальной пожароопасности болот в период до осушения проведена на основе данных, представленных в отчетах о разведке торфяных месторождений [11–13]. В качестве объектов исследования выбраны три типичных для южнотаежной подзоны Томской области осушенных с целью торфодобычи болота общей площадью 124 км² (рисунок). Ландшафтные исследования выполнены на точках согласно [14, 15] и включают в себя описание микрорельефа, растительности, определение типа и мощности торфяной залежи, уровня болотных вод (УБВ), средней поверхности болота, отбор образцов торфа для определения вида торфа верхнего горизонта торфяной залежи. Определение ботанического состава торфа проведено в аккредитованном Лабораторно-аналитическом центре ФГБНУ «СибНИИС-ХиТ» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.10 ПФ01) по ГОСТ 28245–89 «Методы определения ботанического состава и степени разложения торфа» [16].

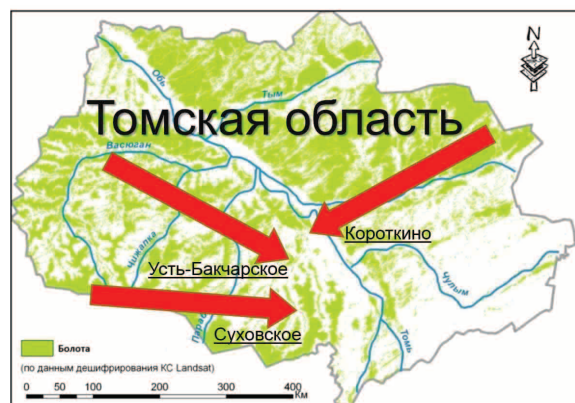


Рисунок. Схема расположения объектов исследования

Figure. Location scheme of objects under study

Оценка потенциальной пожароопасности осушенных болот проведена с использованием ряда шкал, построенных на основе характеристик основных компонентов болотных геосистем, а также степени антропогенной нагрузки на них, и определяется как сумма баллов по каждому критерию оценки (табл. 1) [17]. В качестве основной единицы оценки потенциальной пожароопасности территории принята ландшафтная фация, характеризующаяся однородностью пирологических свойств компонентов на всем ее протяжении. Потенциальная пожароопасность болот, в соответствии с суммой баллов, характеризуется как низкая (0–4 балла), средняя (5–10 баллов), высокая (11–17 баллов).

Оценка вклада в потенциальную пожароопасность неосторожного обращения с огнем местного населения проведена на основе метода геоинформационного моделирования с выделением зон влияния в зависимости от расстояния болот до объектов инфраструктуры (автодороги и населенные пункты) (табл. 1).

Таблица 1. Балльная система оценки факторов пожароопасности заболоченных территорий

Table 1. Point rating system of the fire hazard of wetlands

Критерии оценки Evaluation criteria		Балл пожароопасности Point of fire hazard
Расстояние от объектов инфраструктуры Distance from infrastructure	более 5 км / more than 5 km	0
	1–5 км / 1–5 km	1
	менее 1 км / less than 1 km	2
Тип растительности Type of vegetation	травяная низинная grassy eutrophic	0
	березовая низинная, травяно-моховая переходная и верховая birch eutrophic, grassy and moss mesotrophic and oligotrophic	1
	еловая низинная, древесная переходная, моховая верховая spruce eutrophic, wood mesotrophic, moss oligotrophic	2
	древесно-моховая переходная wood-moss mesotrophic	4
	сосново-кустарничково-сфагновая верховая pine-shrub-sphagnum oligotrophic	6
	УБВ от поверхности болота The level of the mire water from the surface of the mire	выше поверхности higher surface
у поверхности surface	1	
ниже поверхности lower surface	2	
Тип торфа Peat type	низинный / fen peat	1
	переходный / transition peat	2
	верховой / bog peat	3
Вид антропогенной нагрузки Type of anthropogenic load	естественное болото / natural mire	0
	осушение верховых болот / drainage of oligotrophic mires	1
	осушение низинных, переходных болот / drainage of eutrophic, mesotrophic mires	2
	торфодобыча / peat extraction	4

Оценка вклада хозяйственной деятельности в общую потенциальную пожароопасность территории проведена на основе оценки степени изменения геосистем в зависимости от вида антропогенных нагрузок и устойчивости болот разных типов [18] (табл. 1).

Оценка вклада свойств растительного покрова в общую потенциальную пожароопасность территории проведена на основе выделения видов доминантов каждого растительного яруса и определения горючести и легкости их возгорания [19]. В соответствии с классификацией растительных горючих материалов [20] видам доминантам каждого растительного яруса присвоен балл (табл. 2). Оценка общей горючести растительных сообществ определялась как сумма баллов по каждому ярусу.

В соответствии с П.Л. Фалюшиным [21], А.М. Гришиным [22, 23] способность к возгоранию и скорость распространения горения опреде-

ляются значениями минимальной энергии зажигания (значение тепловой энергии, выделяющейся с поверхности источника зажигания, от момента его контакта с поверхностью торфа до момента начала горения), экзотермического эффекта, зависящими от степени разложения, плотности и зольности торфа. Экзотермический эффект с увеличением степени разложения снижается [21, 24], таким образом скорость продвижения очага горения с поверхности торфяной залежи в глубину возрастает от верхового торфа к низинному. С увеличением плотности торфа минимальная энергия зажигания возрастает [22]. Кроме того, значения минимальной энергии зажигания при одинаковой влажности торфа зависят от ботанического состава. Согласно А.М. Гришину [22, 23] увеличение минимальной энергии зажигания происходит от верховых фускум и сосново-сфагнового торфов к низинному древесному торфу. Таким образом, потенциальная пожароопасность возрастает от низинного торфа к верховому (табл. 1).

Таблица 2. Балльная оценка горимости растительности

Table 2. Point rating system of the vegetation burn

Ярус Layer	Доминанты растительных сообществ The dominants of plant communities	Балл Point
Древесный Wood	хвойные / coniferous	2
	лиственные (береза, осина) deciduous (birch, aspen)	1
	ивовые / willow	0
Кустарничковый Shrubs	вересковые / ericaceous	2
	березовые / birch	1
Травяно-моховой Grass and moss	сфагновые мхи, лишайники sphagnum, lichens	2
	гипноновые / мхи / hyrnum	1
	травянистые / grass	0

Результаты и обсуждение

Болото Короткино расположено в Колпашевском районе Томской области, в 35 км на юго-восток от г. Колпашева, в 1,5 км на северо-запад от с. Старокороткино, на первой левобережной террасе р. Оби. Площадь болота составляет 5 км², средняя мощность торфяной залежи – 1,58 м [11]. Вдоль юго-западной окраины болота на расстоянии 0,1–0,2 км проходит автотрасса Томск–Колпашево. По юго-восточной окраине до трассы Томск–Колпашево пролегает улучшенная грунтовая дорога Старокороткино–Новокороткино. В пределах самого болота дороги отсутствуют. Осушение залежи осуществляется сетью открытых каналов. Ширина и глубина карттовых каналов составляет 2 м. Русла осушительных каналов повсеместно подвержены зарастанию осоковыми кочками и кустарничковой растительностью, часто завалены стволами деревьев.

Растительный покров и торфяная залежь болота Короткино пространственно неоднородны. В за-

Таблица 3. Оценка потенциальной пожароопасности болота Короткино**Table 3.** Assessment of potential fire hazard of mire Korotkino

Критерии оценки Evaluation criteria	Березово-травяное низинное болото Birch and grass eutrophic mire	Березово-ивовое травяное низинное болото Birch-willow grass eutrophic mire	Березовое травяно-моховое низинное болото Birch grass-moss eutrophic mire
Расстояние от объектов инфраструктуры Distance from infrastructure	менее 1 км/less than 1 km 2 балла/2 points		
Тип растительности Type of vegetation	березовая/birch 1 балл/1 point		древесно-моховая/wood-moss 4 балла / 4 points
УБВ от поверхности болота The level of the mire water from the surface of the mire	ниже поверхности/lower surface 2 балла/2 points		
Тип торфа Peat type	переходный/transition peat 2 балла/2 points	низинный/fen peat 1 балл/1 point	
Вид антропогенной нагрузки Type of anthropogenic load	осушение низинных, переходных болот/drainage of eutrophic, mesotrophic mires 2 балла/2 points		
Потенциальная пожароопасность (сумма баллов) Potential fire hazard (point total)	средняя/medium 9 баллов/9 points	средняя/medium 8 баллов/8 points	высокая/high 12 баллов/12 points

падной части болота распространены березово-травяные и березово-ивово-травяные низинные фитоценозы. Древесный ярус березово-травяного болота в основном представлен березой высотой от 10 до 15 м, редко встречается ива высотой до 10 м. Сомкнутость крон составляет 50 %. Древесная растительность преимущественно распространена вдоль осушительных каналов. В травяно-моховом ярусе распространены крапива, осока, гипновые мхи. Мощность торфяной залежи составляет около 235 см. Верхний слой залежи (0–25 см) образован древесно-осоковым переходным торфом, глубже залегают древесно-осоково-гипновый и осоково-гипновый низинные торфа. В пределах березово-ивово-травяного низинного болота в древесном ярусе присутствуют береза высотой до 5 м и ива высотой до 2 м с проективным покрытием около 80 %. В травяно-моховом ярусе широкое распространение получили осока и сабельник, доля мхов незначительна. Мощность торфяной залежи составляет 210 см. Вся залежь сложена осоково-гипновым низинным торфом.

Восточную часть болота занимает березовый травяно-моховой фитоценоз. В древесном ярусе преобладает береза высотой 2–3 м, в подросте отмечено появление сосны высотой до 1,5 м. Проектное покрытие древесной растительностью составляет 40–50 %. Травяно-моховой ярус образован осокой, гипновыми и сфагновыми мхами. Мощность торфяной залежи составляет 200 см. Залежь низинного типа сложена в основном осоково-гипновым низинным торфом.

Согласно данным разведки 1977 г. [11] до осушения болото было представлено сосново-кустарничковыми, березово-травяными и сосново-березовыми разнотравно-сфагновыми фитоценозами. Потенциальная пожароопасность болота оценивалась как низкая (4 балла). Осушительная мелиорация привела к некоторому изменению видового состава

растительного покрова болота. В настоящее время отмечено увеличение высоты и сомкнутости древесного яруса, практически полное исчезновение сосны и вересковых кустарничков, смена сфагновых мхов на гипновые. Такая динамика растительного покрова определяется постоянно низким уровнем болотных вод – до 1,5 м ниже поверхности и глубже, что оказывает существенное влияние на увеличение потенциальной пожароопасности болота – от низкой до момента осушения к средней и высокой в настоящее время. На современном этапе развития болота при незначительных пространственных различиях, определяющихся неоднородностью растительного покрова и торфяной залежи, в целом пожароопасность изменяется от 8 до 12 баллов (табл. 3). Степень потенциальной пожароопасности определяется положением болота вблизи дорог и населенных пунктов и, как следствие, доступностью для местного населения, низким уровнем болотных вод в результате проведенной осушительной мелиорации, низкой естественной способностью к возгоранию березовой, ивовой и травяной растительности и низинного торфа.

Болото Суховское расположено в Бакчарском и Чаинском районах Томской области, в 12 км на северо-восток от с. Бакчар, на первой надпойменной террасе р. Бакчар. Площадь болота составляет 115 км². Средняя глубина торфяной залежи 2,91 м. Торфяная залежь сложена низинными видами торфа, переходные виды распространены незначительно [12]. Южная часть болота осушена с целью добычи торфа. Вдоль северной окраины осушенной части болота проходит грунтовая дорога (с. Сухое – с. Подольск). Внутри болота дороги отсутствуют. В пределах болота проложена осушительная сеть в виде картовых и валовых каналов. Расстояние между картовыми каналами 40 м. Валовый канал зарос травяной растительностью, обмелел, стенки частично разрушены.

Растительный покров осушенной части болота однородный и представлен березово-травяным и березовым фитоценозами с развитым древесным ярусом высотой 7–10 м и проективным покрытием 50 %. В травяном покрове отсутствуют влаголюбивые виды, что свидетельствует о постоянном низком уровне болотных вод. Мощность торфяной залежи в пределах березово-травяного фитоценоза изменяется от 2 до 4,5 м. Вся залежь однородна и сложена осоково-гипновым низинным торфом. Строение торфяной залежи свидетельствует о существовании здесь в период до проведения осушения в условиях высокой обводненности осоковых и осоково-гипновых фитоценозов, сохранившихся в настоящее время в естественной части болота. Потенциальная пожароопасность болота до осушения составляла 3–4 балла и оценивалась как низкая. По данным [12], в первые годы после осушения (1985 г.) в южной части болота был распространен березово-осоковый фитоценоз с густым травяно-моховым ярусом из болотных видов (осоки, вахта, сабельник, хвощ, гипновые мхи). Смена растительности и понижение уровня болотных вод привело к увеличению потенциальной пожароопасности до 6–7 баллов. На современном этапе развития болота потенциальная пожароопасность характеризуется как средняя и определяется низким уровнем болотных вод, вследствие проведенной осушительной мелиорации, близостью к дороге и населенным пунктам при низкой способности к возгоранию низинного торфа, березовой и травяной растительности (табл. 4).

Таблица 4. Оценка потенциальной пожароопасности болота Суховское

Table 4. Assessment of potential fire hazard of mire Sukhovskoe

Критерии оценки Evaluation criteria	Березово-травяное низинное болото Birch and grass eutrophic mire	Березовое низинное болото Birch eutrophic mire
Расстояние от объектов инфраструктуры Distance from infrastructure	менее 1 км/less than 1 km 2 балла/2 points	
Тип растительности Type of vegetation	березовая/birch 1 балл/1 point	
УБВ от поверхности болота The level of the mire water from the surface of the mire	ниже поверхности lower surface 2 балла/2 points	
Тип торфа Peat type	низинный/fen peat 1 балл/1 point	
Вид антропогенной нагрузки Type of anthropogenic load	осушение низинных болот drainage of eutrophic mires 2 балла / 2 points	
Потенциальная пожароопасность (сумма баллов) Potential fire hazard (points total)	средняя/medium 8 баллов/8 points	

Болото Усть-Бакчарское расположено в Чаинском районе Томской области, в 23 км на юго-за-

пад от с. Подгорное и 4 км на юго-запад от с. Усть-Бакчар, на второй надпойменной террасе р. Бакчар. Площадь болота составляет 3,56 км². Средняя мощность торфяной залежи – 1,67 м. В образовании торфяной залежи основная роль принадлежит фускум-торфу [13]. С северной стороны в 0,7–1,2 км от болота проходит трасса Колпашево–Подгорное–Бакчар. На большей части болота в 1970 г. проведена осушительная мелиорация с целью добычи торфа. Осушение залежи осуществляется сетью открытых канав. Ширина и глубина картовых каналов составляет в среднем 1,5 м. На отдельных участках русла каналов подвержены зарастанию сфагновыми мхами, осоками и кустарничковой растительностью. Повсеместно наблюдается завалы из сухих деревьев. Длина канала от торфяного месторождения до водоприемника около 0,5 км. Состояние канала на данном участке хорошее, русло чистое, наблюдается течение. Южная часть болота находится в естественном состоянии [25].

Растительный покров северной части болота Усть-Бакчарское представлен березой высотой от 3 до 5 м, сосной до 4 м. Обильно развит кустарничковый ярус из багульника и голубики. Мощность торфяной залежи составляет 290 см. Верхние 5 см залежи сложены верховым фускум-торфом, глубже залегает слой верхового магелланикум-торфа. Южнее в древесном ярусе появляются сосна высотой 5 м с единичными березами высотой около 3 м, много поваленных деревьев. Проективное покрытие участка древесной растительностью составляет 15 %. Кустарничковый ярус образован багульником и хамедафне. Мощность торфяной залежи составляет 210 см. Верхний слой залежи (0–30 см) сложен комплексным верховым торфом. Древесный ярус центральной части болота состоит из березы высотой 3 м. Проективное покрытие данного участка древесным ярусом составляет 30 %. Обильно развит кустарничковый ярус из багульника, голубики, хамедафне. Проективное покрытие гипновыми мхами достигает 80 %. Мощность торфяной залежи составляет 260 см. Верхний слой залежи (0–130 см) сложен верховым фускум-торфом.

До проведения осушительной мелиорации в растительном покрове болота доминировали олиготрофные виды – сосна, сфагновые мхи и др. Болото характеризовалось естественной высокой потенциальной пожароопасностью (12 баллов), связанной с высокой способностью к возгоранию сосново-кустарничково-сфагновой растительности и мохового сфагнового торфа. Осушение болота привело к увеличению пожароопасности до 14 баллов на участках с доминированием в растительном покрове сосны и сфагновых мхов. Смена растительности с сосново-сфагновой на березово-гипновую способствовала уменьшению вклада растительности в общую потенциальную пожароопасность болота, поэтому вследствие осушения увеличение пожароопасности не произошло (табл. 5).

Таблица 5. Оценка потенциальной пожароопасности болота Усть-Бакчарское**Table 5.** Assessment of potential fire hazard of mire Ust-Bakcharskoe

Критерии оценки Evaluation criteria	Березово-кустарничковое осоково-гипновое верховое болото Birch-shrub sedge- hyppnum oligotrophic mire	Сосново-кустарничковое верховое болото Pine-shrub oligotrophic mire	Березово-кустарничково- гипновое верховое болото Birch-shrub-hyppnum oligo- trophic mire
Расстояние от объектов инфраструктуры Distance from infrastructure	менее 1 км/less than 1 km 2 балла/2 points		
Тип растительности Type of vegetation	древесно-моховая wood-moss 4 балла 4 points	сосново-кустарничковая pine-shrub 6 баллов 6 points	древесно-моховая wood-moss 4 балла 4 points
УБВ от поверхности болота The level of the mire water from the surface of the mire	ниже поверхности/lower surface 2 балла/2 points		
Тип торфа Peat type	верховой/bog peat 3 балла/3 points		
Вид антропогенной нагрузки Type of anthropogenic load	осушение верховых болот drainage of oligotrophic mire 1 балл/1 point		
Потенциальная пожароопасность (сумма баллов) Potential fire hazard (points total)	высокая high 12 баллов 12 points	высокая high 14 баллов 14 points	высокая high 12 баллов 12 points

Заключение

Проведенные исследования показали, что для рассмотренных болот характерен средний и высокий уровень потенциальной пожароопасности, что главным образом связано с низким уровнем болотных вод, вследствие проведения осушительной мелиорации, доступностью болота для местного населения как места проведения охоты и сбора дикоросов. Максимальный рост потенциальной пожароопасности, вследствие проведенной осушительной

мелиорации, характерен для низинных болот Суховское и Короткино, где произошла смена растительности с березово-травяной и травяно-моховой на древесную, что при низком уровне болотных вод привело к увеличению потенциальной пожароопасности с 3–4 до 8–12 баллов. Для осушенных верховых болот характерно незначительное увеличение потенциальной пожароопасности в сравнении с аналогичными ненарушенными участками, что связано с высокой естественной способностью к возгоранию сосново-кустарничково-сфагновой растительности и сфагнового торфа. При незначительном росте балла пожароопасности проведенная осушительная мелиорация в совокупности со свойствами растительного покрова и торфяной залежи определяют максимальные значения потенциальной пожароопасности в пределах верховых осушенных болот.

Неудовлетворительная работа осушительной сети в пределах всех рассмотренных участков и возвращение болот в состояние, близкое к естественному, при отсутствии мероприятий по восстановлению осушительной сети и регулированию стока, может оказать неоднозначное влияние на динамику потенциальной пожароопасности территории. Повышение уровня болотных вод будет способствовать существенному уменьшению потенциальной пожароопасности болота. При этом произойдет усыхание древесной растительности, имеющей значительное проективное покрытие на всех обследуемых участках, а наличие сухих стволов и поваленных деревьев внесет значительный вклад в увеличение потенциальной пожароопасности неиспользуемых в настоящее время осушенных болот. Поэтому в целях профилактики торфяных пожаров на неиспользуемых осушенных болотах необходимо поднять уровень болотных вод, создав двустороннюю систему регулирования влажности [26].

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить территории, характеризующиеся высокими значениями потенциальной пожароопасности, и могут являться основой для прогнозирования рисков возникновения торфяных пожаров, а также для разработки рекомендаций по рациональному использованию и снижению пожароопасности антропогенно нарушенных болот Томской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Effect of fire on phosphorus forms in Sphagnum moss and peat soils of ombrotrophic bogs / W. Guoping, Yu. Xiaofei, B. Kunshan, X. Wei, G. Chuanyu, L. Qianxin, L. Xianguo // *Chemosphere*. – 2015. – V. 119. – P. 1329–1334.
- Peat-fire-related air pollution in Central Kalimantan, Indonesia / H. Hayasaka, I. Noguchi, E. Putra, E. Yulianti, K. Vadrevu // *Environmental Pollution*. – 2014. – V. 195. – P. 257–266.
- The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 / S.E. Page, F. Siegert, J.O. Rieley, H.V. Boehm, A. Jaya, S. Limin // *Nature*. – 2002. – V. 420 (6911). – P. 61–65.
- Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive / M. Lamentowicz, M. Slowiński, K. Marcisz, M. Zielińska, K. Kaliszana, E. Lapshinae, D. Gilbertf, A. Butlerf, B. Flalkiewicz-Koziełb, V.E.J. Jasseyg, F. Laggoun-Defargei, P. Kolaczek // *Quaternary Research*. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0033589415000885> (дата обращения: 15.05.2015).
- Хакимов И.Р., Синюткина А.А. Динамика возникновения торфяных пожаров на территории Томской области за 2009–2012 гг. // *Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы IV Международного по-*

- левого симпозиума (Новосибирск, 4–17 августа 2014 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – С. 366–369.
6. Фильков А.И. О создании системы прогноза торфяной пожарной опасности // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 1. – С. 18–24.
 7. Зубарева А.М., Фетисов Д.М. Использование ландшафтного метода при изучении природной пожароопасности территорий Еврейской автономной области // Региональные проблемы. – 2012. – Т. 15. – № 2. – С. 34–37.
 8. Зубарева А.М., Фетисов Д.М. Комплексная оценка природной пожароопасности в Еврейской автономной области // География и природные ресурсы. – 2014. – № 4. – С. 138–145.
 9. ГИС-Технология оценки пожароопасности геоконплексов северо-запада России / А.А. Бобков, А.П. Вершинин, В.М. Щербатов, Е.А. Паниди // Вестник СПбГУ. Сер. 7. – 2006. – Вып. 4. – С. 122–127.
 10. Мячина К.В. Анализ пожарных рисков в Оренбургской области // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2012. – № 4. – С. 8. URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2012-4/Articles/Myachina%202012-4%2029.pdf> (дата обращения: 20.08.2015).
 11. Отчет о разведке торфяного месторождения «Короткино-1» Колпашевского района Томской области / Новосибирская геолого-поисковая экспедиция Новосибирского территориального геологического управления, Министерство геологии РСФСР. – Новосибирск, 1977. – 80 с.
 12. Отчет о детальной разведке торфяного месторождения «Усть-Бакчарское» Чаинского района Томской области / Новосибирская геолого-поисковая экспедиция Новосибирского территориального геологического управления, Министерство геологии РСФСР. – Новосибирск, 1976. – 112 с.
 13. Геологический отчет о детальной разведке торфяного месторождения «Суховское» Бакчарского, Чаинского районов Томской области / Новосибирское производственное геологическое объединение «Новосибирскгеология», Сибирская геологоразведочная экспедиция. – Новосибирск, 1985. – 176 с.
 14. Жучкова В.К., Раковская Э.М. Методы комплексных физико-географических исследований. – М.: Академия, 2004. – 368 с.
 15. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. Гидрометеорологические наблюдения на болотах. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 360 с.
 16. ГОСТ 28245–89. Методы определения ботанического состава и степени разложения торфа. – М.: Стандартиформ, 2006. – 6 с.
 17. Хакимов И.Р., Синюткина А.А. Комплексная система оценки пожароопасности заболоченных территорий (на примере Шегарского района Томской области) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 1 (3). – С. 688–691.
 18. Ландшафты болот Томской области / под ред. Н.С. Евсеевой. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012. – 400 с.
 19. Петров В.В. Жизнь леса и человека. – М.: Наука, 1985. – 132 с.
 20. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. – Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины им. В.Н. Сукачева АН СССР, 1970. – С. 5–58.
 21. Фалюшин П.Л. О механизме распространения очага горения в торфе // Природопользование. – 2011. – Вып. 19. – С. 204–206.
 22. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков, Ю.И. Прейс // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79 – № 3. – С. 137–142.
 23. Гришин А.М., Зима В.П., Касымов Д.П. О механизме заглибления очага горения торфа // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 5. – С. 937–942.
 24. Козлов В.Н., Нимвицкий А.А. Технология пирогенетической переработки древесины. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1954. – 620 с.
 25. Оценка современного состояния перспективных для освоения участков торфяных месторождений Томской области / А.А. Синюткина, А.А. Малолетко, А.А. Беленко, Л.П. Гашкова, Ю.А. Харанжевская // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 12. – Т. 28. – С. 72–75.
 26. Бадмажапова И.А., Гынинова А.Б. Трансформация болотных почв Усть-Селенгинской впадины в результате пожаров // География и природные ресурсы. – 2014. – № 3. – С. 68–75.

Поступила 17.11.2015 г.

UDC 911.52

ASSESSMENT OF POTENTIAL FIRE RISK OF TOMSK REGION MIRES

Anna A. Sinyutkina,

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, Gagarina Street, Tomsk, 634050, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Elena N. Burnashova,

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, Gagarina Street, Tomsk, 634050, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lictgestalte@mail.ru

Alexey A. Belenko,

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, Gagarina Street, Tomsk, 634050, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: valenso77@mail.ru

Lyudmila P. Gashkova,

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, Gagarina Street, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gashkova-lp@rambler.ru

Anton A. Maloletko,

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, Gagarina Street, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: maloletko.anton@yandex.ru

The relevance of the research is determined by the need to assess the impact of drainage reclamation as a factor in the formation of a potential fire hazard.

The main aim of the study is assessment of the potential fire hazard of typical drained mires of Tomsk region.

The methods used in the study. Determination of the potential fire hazard is conducted using the point system evaluation of factors of fires within the mires on the basis of the field landscape studies carried out in 2014–2015. The scales of the potential fire hazard assessments are based on the pyrogenic characteristics of the mire geosystems components (plant layer dominant, mire water level, upper layer peat type), and the degree of anthropogenic load on them. Potential fire hazard of a territory is defined as a sum of points for each evaluation criterion.

Results. Mires under investigation are characterized by medium and high potential fire hazard due to the low level of mires waters as a result of drainage reclamation, mire availability for local people as a place of hunting and gathering wild plants. Oligotrophic drained mires are characterized by greatest potential fire hazard due to the ease of ignition and flammability of pine, heather bushes, sphagnum moss and peat. Thus, the studies have revealed the most fire hazardous areas and may form the basis for predicting the risks of peat fires, for developing recommendations of the rational use and for reduction of fire hazard of anthropogenically disturbed mires of Tomsk region.

Key words:

Wildfire, drainage melioration, rating system, landscape study, anthropogenic impact.

REFERENCES

1. Guoping W., Xiaofei Yu., Kunshan B., Wei X., Chuanyu G., Qianxin L., Xianguo L. Effect of fire on phosphorus forms in Sphagnum moss and peat soils of ombrotrophic bogs. *Chemosphere*, 2015, vol. 119, pp. 1329–1334.
2. Hayasaka H., Noguchi I., Putra E., Yulianti E., Vadrevu K. Peat-fire-related air pollution in Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Pollution*, 2014, vol. 195, pp. 257–266.
3. Page S.E., Siegert F., Rieley J.O., Boehm H.V., Jaya A., Limin S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 2002, vol. 420 (6911), pp. 61–65.
4. Lamentowicz M., Slowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszana K., Lapshina E., Gilbert D., Buttler A., Fialkiewicz-Kozieleb B., Jasseg V.E.J., Lagoun-Defargei F., Kolaczek P. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive. *Quaternary Research*. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0033589415000885> (accessed 15 May 2015).
5. Khakimov I.R., Sinyutkina A.A. Dinamika vznikeniya torfyanykh pozharov na territorii Tomskoy oblasti za 2009–2012 gg. [Dynamics of emergence of peat fires in the Tomsk region, 2008 to 2012]. *Materialy IV Mezhdunarodnogo Polevogo Simpoziuma «Torfyanyki Zapadnoy Sibiri i tsikl ugleroda: proshloe i nastoyashchee»* [Proc. 4th Int. Field Symp. West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: past and present]. Tomsk, 2014. pp. 366–369.
6. Filkov A.I. O sozdaniy sistemy prognoza torfyanykh pozharov opasnosti [About development of peat fire danger predicting system]. *Pozhary i chrezvychnyye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya*, 2013, no. 1, pp. 18–24.
7. Zubareva A.M., Fetisov D.M. Ispolzovanie landshaftnogo metoda pri izuchenii prirodnoy pozharopasnosti territoriy Evreyskoy avtonomnoy oblasti [Application of the landscape method to the

- study of natural fire risk in the Jewish autonomous region territory]. *Regionalnye problemy*, 2012, vol. 15, no. 2, pp. 34–37.
8. Zubareva A.M., Fetisov D.M. Kompleksnaya otsenka prirodnoy pozharoopasnosti v Evreyskoy avtonomnoy oblasti [Comprehensive assessment of natural hazard in Jewish autonomous region]. *Geography and Natural Resources*, 2014, no. 4, pp. 138–145.
 9. Bobkov A.A., Vershinin A.P., Shcherbakov V.M., Panidi E.A. GIS-Tekhnologiya otsenki pozharoopasnosti geokompleksov severo-zapada Rossii [GIS-technology of wild fire danger estimation of geocomplexes in the North-West of Russia]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Ser. 7*, 2006, iss. 4, pp. 122–127.
 10. Myachina K.V. Analiz pozharnykh riskov v Orenburgskoy oblasti [The analysis of fire risks for Orenburg region]. *Byulleten Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2012, no. 4, p. 8. Available at: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2012-4/Articles/Myachina%202012-4%2029.pdf> (accessed 20 August 2015).
 11. *Otchet o razvedke torfyanoego mestorozhdeniya «Korotkino-1» Kolpashевского rayona Tomskoy oblasti* [Report on the exploration of peat deposit «Korotkino-1» Kolpashovsky district of Tomsk region]. Novosibirsk, 1977. 80 p.
 12. *Otchet o detalnoy razvedke torfyanoego mestorozhdeniya «Ust-Bakcharskoe» Chainskogo rayona Tomskoy oblasti* [Report on detailed exploration of peat deposit «Ust-Bakchar» Chainsky district of Tomsk region]. Novosibirsk, 1976. 112 p.
 13. *Geologicheskii otchet o detalnoy razvedke torfyanoego mestorozhdeniya «Sukhovskoe» Bakcharskogo, Chainskogo rayonov Tomskoy oblasti* [Report on detailed geological exploration of peat deposit «Sukhoi» Bakchar, Chainsky districts of Tomsk region]. Novosibirsk, 1985. 176 p.
 14. Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy* [Methods of complex physical and geographic research]. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 368 p.
 15. *Nastavleniya gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vyp. 8. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na bolotakh* [Manual for hydrometeorological stations and centers. Iss. 8. Hydrometeorological observations in the mires]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 360 p.
 16. GOST 28245–89. *Metody opredeleniya botanicheskogo sostava i stepeni razlozheniya torfa* [State Standard 28245–89. Methods for determination of botanical composition and the degree of decomposition of peat]. Moscow, Standartinform, 2006. 6 p.
 17. Khakimov I.R., Sinyutkina A.A. Kompleksnaya sistema otsenki pozharoopasnosti zabolochennykh territoriy (na primere Shegarskogo rayona Tomskoy oblasti) [Complex system of the assessment of fire danger at wetlands (on the example of Shegarskiy region in Tomsk region)]. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1 (3), pp. 688–691.
 18. *Landshafty bolot Tomskoy oblasti* [Mire landscapes of Tomsk region]. Tomsk, NTL Publ., 2012. 400 p.
 19. Petrov V.V. *Zhizn lesa i cheloveka* [The life of the forest and humans]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 132 p.
 20. Kurbatskiy N.P. Issledovanie kolichestva i svoystv lesnykh goryuchikh materialov [Quantity and properties research of forest fuel]. *Voprosy lesnoy pirologii*. Krasnoyarsk, In-t lesa i drevesiny im. V.N. Sukacheva AN SSSR Press, 1970, pp. 5758.
 21. Falyushin P.L. O mekhanizme rasprostraneniya ochaga goreniya v torfe [On the mechanism of propagation of the hearth burning peat]. *Prirodopolzovanie*, 2011, iss. 19, pp. 204–206.
 22. Grishin A.M., Golovanov A.N., Sukov Ya.V., Preys Yu.I. Eksperimentalnoe issledovanie protsessov zazhiganiya i goreniya torfa [Experimental study of the processes of ignition and burning of peat]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2006, vol. 79, no. 3, pp. 137–142.
 23. Grishin A.M., Zima V.P., Kasymov D.P. O mekhanizme zaglublenniya ochaga goreniya torfa [On the mechanism of the deep sources of burning peat]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2013, vol. 89, no. 5, pp. 937–942.
 24. Kozlov V.N., Nimvitskiy A.A. *Tekhnologiya pirogeneticheskoy pererabotki drevesiny* [Technology of pyrogenetic wood processing]. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat, 1954. 620 p.
 25. Sinyutkina A.A., Maloletko A.A., Belenko A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. Otsenka sovremennogo sostoyaniya perspektivnykh dlya osvoeniya uchastkov torfyanykh mestorozhdeniy Tomskoy oblasti [Assessment of the current state of the promising areas for the development of peat deposits of Tomsk region]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2014, vol. 28, no. 12, pp. 72–75.
 26. Badmazhapova I.A., Gyninova A.B. Transformatsiya bolotnykh pochv Ust-Selenginskoy vpadiny v rezultate pozharov [Fire-induced transformation of bog soils in the Ust-Selenginskaya depression]. *Geography and Natural Resources*, 2014, no. 3, pp. 68–75.

Received: 17 November 2015.

УДК 519.688: 622.276

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ИНДИКАТОРНОЙ КРИВОЙ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Нгуен Тхак Хоай Фьонг,

аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: nguyenuongtpu1512@gmail.com

Сергеев Виктор Леонидович,

д-р техн. наук, профессор кафедры геологии и разработки нефтяных
месторождений Института природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: SergeevVL@ignd.tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения информативности результатов стационарных газодинамических исследований скважин, сокращением количества режимов и длительности исследований скважин, уменьшением выбросов газа в атмосферу.

Цель исследования. Разработка метода идентификации и интерпретации стационарных газодинамических исследований скважин по индикаторной кривой, позволяющего учитывать дополнительную априорную информацию, повысить точность определения пластового давления и фильтрационных параметров, сократить время исследований.

Методы исследования. Используются теоретические и практические разработки в области газодинамических исследований скважин, системного анализа, идентификации систем, оптимизации функций и линейной алгебры. В основе предлагаемого метода использовалась интегрированная система моделей индикаторной кривой с учетом дополнительной априорной информации и экспертных оценок пластового давления и фильтрационных параметров пласта. Определение параметров модели индикаторной кривой, представляющей двучленный закон фильтрации Форхгеймера, и управляющих параметров, определяющих значимость (вес) экспертных оценок, проводилось путем решения двух оптимизационных задач с использованием квадратичных показателей качества. Для апробации метода использовались промысловые данные стационарных газодинамических исследований скважин месторождения Тюменской области по индикаторной кривой и экспертные оценки пластового давления и фильтрационных параметров пласта.

Результаты. Разработан метод идентификации и интерпретации стационарных газодинамических исследований скважин по индикаторной кривой, позволяющий учитывать дополнительную априорную информацию, определять наилучшим, в смысле заданных показателей качества, образом пластовое давление и коэффициенты фильтрационных сопротивлений. На примере обработки результатов газодинамических исследований скважин по индикаторной кривой показано, что метод позволяет повысить точность определения пластового давления, коэффициентов фильтрационного сопротивления, сократить количество режимов и длительность исследований.

Ключевые слова:

Идентификация, интерпретация, газодинамические исследования скважин, индикаторная кривая, интегрированные системы моделей, априорная информация, газоконденсатные месторождения.

Введение

Газодинамические исследования скважин (ГДИС) на стационарных режимах фильтрации по индикаторной кривой (ИК) являются в настоящее время одним из основных методов получения информации о текущем состоянии скважины и ее призабойной зоны [1–10]. При интерпретации ГДИС на стационарных режимах фильтрации часто используется двучленный закон фильтрации Форхгеймера [3–5, 11–18]. В данном случае модель ИК, представляющая зависимость потерь пластовой энергии от дебита скважины, имеет вид

$$p_{пл}^2 - p_3^2 = aq + bq^2, \quad (1)$$

где $p_{пл}^2$, p_3^2 – пластовое и забойное давление соответственно; a и b – коэффициенты фильтрационного сопротивления, зависящие от параметров призабойной зоны пласта и конструкции забоя скважины; q – дебит скважины.

В работах [3–5, 11] коэффициенты фильтрационного сопротивления a и b в модели ИК (1) предлагается оценивать методом наименьших квадратов при известном значении пластового давления. Однако использование такой технологии идентификации ИК, основанной на модели (1) и методе наименьших квадратов, в реальных промысловых условиях вызывает значительные трудности, связанные с определением пластового давления, обеспечением устойчивости оценок, повышением их точности, сокращением режимов и длительности исследований скважин, уменьшением выбросов газа в атмосферу.

В данной работе рассматривается метод идентификации ИК на основе технологии интегрированных моделей [19, 20] с учетом дополнительной априорной информации, позволяющий наряду с коэффициентами фильтрационного сопротивления определять пластовое давление, повысить точность

определения фильтрационных параметров и сократить количество режимов исследований скважин.

Модели и алгоритмы идентификации индикаторной кривой

Основой предлагаемого метода идентификации является интегрированная система моделей (ИСМ) ИК с учетом дополнительной априорной информации о пластовом давлении $p_{пл}$ и коэффициенты фильтрационного сопротивления a, b :

$$\begin{cases} y_i^* = f(a, b, p_{пл}^2, q_i) + \xi = p_{пл}^2 - a q_i - b q_i^2 + \xi, \\ \bar{p}_{пл}^{-2} = p_{пл}^2 + v, \bar{a} = a + \eta_1, \bar{b} = b + \eta_2, i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2)$$

где $y_i^* = p_{i,з}^2$, q_i – значения квадрата забойного давления и дебита, полученные на режиме испытания скважины с номером i ; $\bar{p}_{пл}^{-2}$, \bar{a} , \bar{b} – дополнительные априорные данные и экспертные оценки квадрата пластового давления и коэффициентов фильтрационного сопротивления; n – число режимов испытания скважины; $\xi_i, \eta_j, j = \overline{1, 3}$ – случайные величины, представляющие погрешности измерений дебита и забойных давлений скважины, ошибки дополнительных данных и экспертных оценок, неточность моделей и т. п.

Рассмотрим процедуру определения коэффициентов фильтрационного сопротивления и пластового давления ИСМ ИК (2), представленной для удобства в матричном виде:

$$\begin{cases} Y^* = F\alpha + \xi, \\ \bar{\alpha} = \alpha + \eta, \end{cases} \quad (3)$$

где $F = (x_{i,j}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, 3})$ – матрица значений дебита скважины на разных режимах ее работы, в которой $x_{i,1} = 1, x_{i,2} = -q_i, x_{i,3} = -q_i^2$; $\alpha = (\alpha_1 = p_{пл}^2, \alpha_2 = a, \alpha_3 = b)$ – вектор неизвестных значений параметров модели ИК; $\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}_j, j = \overline{1, 3})$ – вектор дополнительных априорных данных и экспертных оценок квадрата пластового давления $\bar{\alpha}_1 = \bar{p}_{пл}^2$ и фильтрационных параметров пласта $\bar{\alpha}_2 = \bar{a}, \bar{\alpha}_3 = \bar{b}$. Идентификация ИСМ ИК (3) с использованием технологии интегрированных моделей заключается в решении двух оптимизационных задач [19, 20]:

$$\alpha^*(\beta) = \arg \min_{\alpha} \Phi(\alpha, \beta), \quad (4)$$

$$\beta^* = \arg \min_{\beta} J_0(\alpha^*, \beta), \quad (5)$$

где запись $\arg \min_x f(x)$ означает точку минимума x^* функции $f(x)$ ($f(x^*) = \min_x f(x)$). Комбинированный эмпирический показатель качества системы моделей (3) $\Phi(\alpha, \beta) = \Phi(J_0(\alpha), J_a(\alpha, \beta))$ представляет заданную функцию (функционал) Φ от частного показателя качества модели индикаторной кривой

$$J_0(\alpha) = \sum_{i=1}^n \psi_0(y_i^* - \alpha_1 + \alpha_2 q_i + \alpha_3 q_i^2) \quad (6)$$

и частного показателя качества моделей дополнительных априорных сведений

$$J_a(\alpha, \beta) = \sum_{j=1}^3 \beta_j \psi_a(\bar{\alpha}_j - \alpha_j), \quad (7)$$

где $\beta = (\beta_j, j = \overline{1, 3})$ – вектор управляющих параметров, определяющих значимость (вес) дополнительных априорных сведений $\bar{\alpha}$, а ψ_0, ψ_a – заданные функции.

Результаты интерпретации газодинамических исследований скважин по ИК

Результаты интерпретации стационарных газодинамических исследований скважин Уренгойского газоконденсатного месторождения Тюменской области приведены на рис. 1–7 и в табл. 1, 2. На рис. 1 приведены измеренные значения забойного давления и дебита скважин № 1 и № 2, изображенные линиями 1 и 2 соответственно.

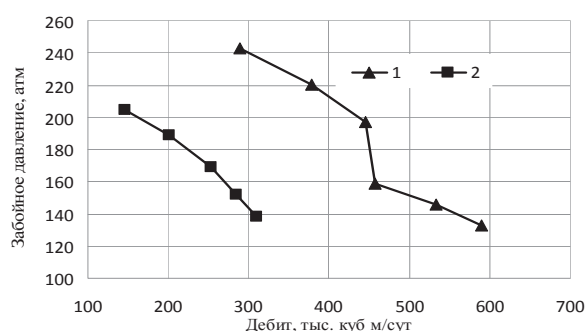


Рис. 1. Индикаторные кривые скважин № 1, № 2

Fig. 1. Indicator diagrams of wells no. 1, 2

На рис. 2–7 (линия 1) приведены оценки пластового давления и коэффициентов фильтрационного сопротивления на разных режимах работы скважин, полученные путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$(F^T F + W(\beta))\alpha(\beta) = (F^T Y^* + W\beta \bar{\alpha}). \quad (8)$$

Отметим, что СЛАУ следует из (6) [19] при использовании комбинированного показателя качества

$$\Phi(\alpha, \beta) = \|Y^* - F\alpha\|^2 + \|\bar{\alpha} - \alpha\|_{W(\beta)}^2,$$

где запись $\|X\|_W^2$ означает квадратичную форму $X^T W X$; $W(\beta) = \text{diag}(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ – диагональная матрица управляющих параметров.

Линией 2 (см. рис. 2–7) изображены оценки пластового давления и коэффициентов фильтрационного сопротивления, полученные традиционным методом наименьших квадратов путем решения СЛЮ

$$(F^T F)\alpha(0) = F^T Y^*, \quad (9)$$

следующей из (8) при значениях управляющих параметров β , равных нулю.

Используемые значения вектора дополнительных априорных данных α – приведены в табл. 1. Оценки вектора управляющих параметров β^* определялись путем решения оптимизационной задачи (5) методом деформированного многогранника [21].

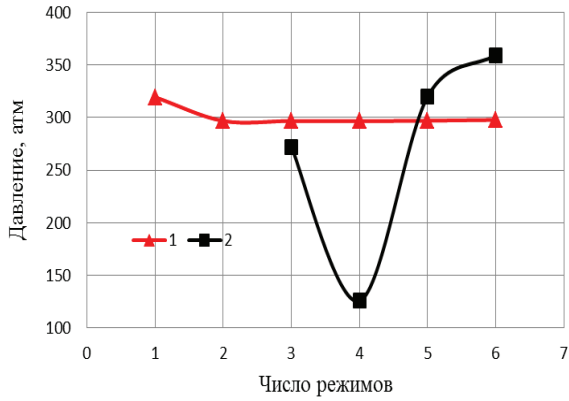


Рис. 2. Оценки пластового давления скважины № 1

Fig. 2. Estimates of reservoir pressure of well no. 1

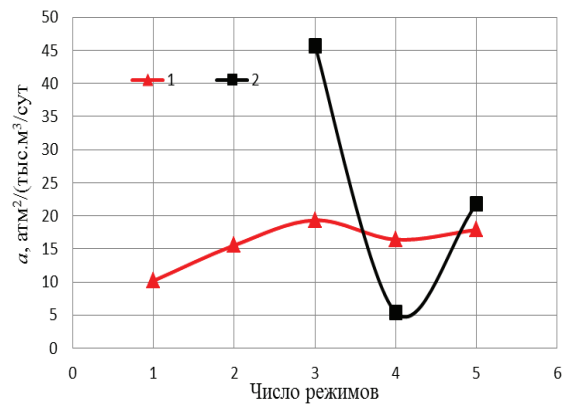


Рис. 5. Оценки коэффициента фильтрационного сопротивления a скважины № 2

Fig. 5. Estimates of filtration resistance coefficient a of well no. 2

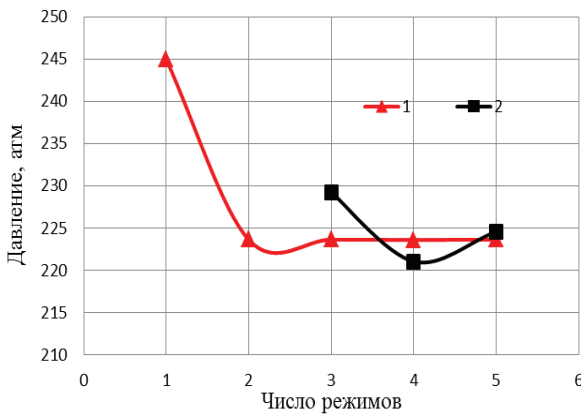


Рис. 3. Оценки пластового давления скважины № 2

Fig. 3. Estimates of reservoir pressure of well no. 2

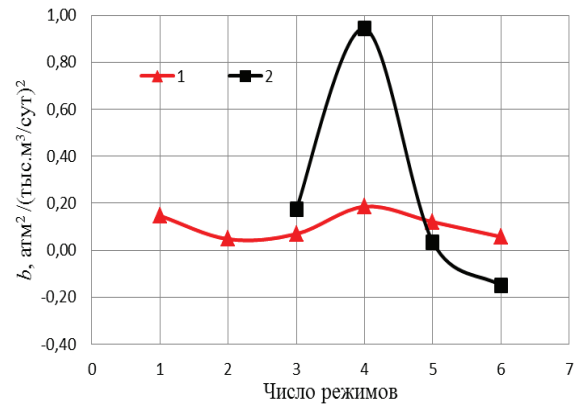


Рис. 6. Оценки коэффициента фильтрационного сопротивления b скважины № 1

Fig. 6. Estimates of filtration resistance coefficient b of well no. 1

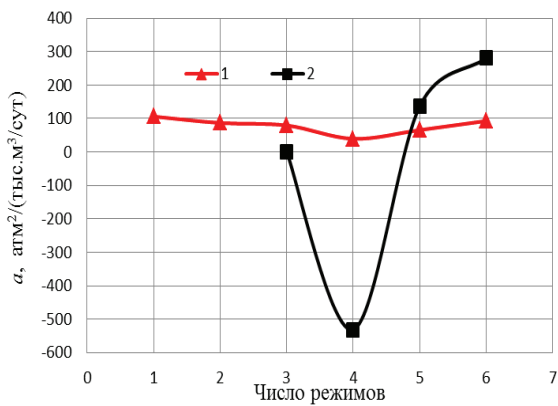


Рис. 4. Оценки коэффициента фильтрационного сопротивления a скважины № 1

Fig. 4. Estimates of filtration resistance coefficient a of well no. 1

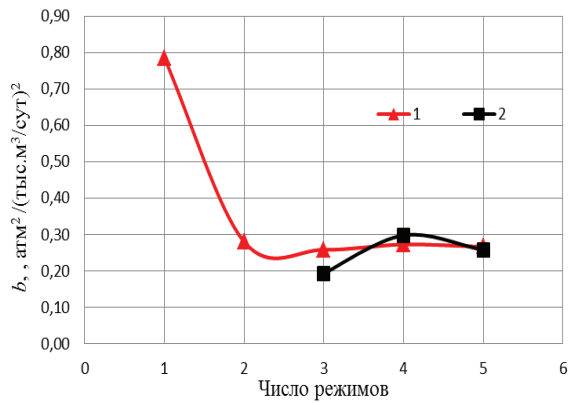


Рис. 7. Оценки коэффициента фильтрационного сопротивления b скважины № 2

Fig. 7. Estimates of filtration resistance coefficient b of well no. 2

Таблица 1. Дополнительные априорные данные и экспертные оценки

Table 1. Additional a priori information and expert estimates

Скважины Wells	Пластовое давление, атм Reservoir pressure, atm	Коэффициенты фильтрационного сопротивления Filtration resistance coefficients	
		\bar{a} , атм ² /(тыс. м ³ /сут) \bar{a} , атм ² /(10 ³ м ³ /d)	\bar{b} , атм ² /(тыс. м ³ /сут) ² \bar{b} , атм ² /(10 ³ м ³ /d) ²
1	312	100	0,1
2	245	20	0,4

В табл. 2 приведены оценки коэффициентов фильтрационного сопротивления и пластового давления, полученные на основе метода интегрированных моделей (ИМ) путем решения СЛАУ (8) и метода наименьших квадратов (НК) путем решения СЛАУ (9).

Из рис. 1–7 и табл. 2 видно, что предложенный метод, модели (2), (3) и алгоритмы интерпретации ИК (4)–(8) позволяют более точно определять пластовое давление, коэффициенты фильтрационного сопротивления и сократить число режимов исследования скважин по сравнению с традиционной технологией интерпретации, основанной на методе наименьших квадратов (9).

Выводы

1. Предложен метод идентификации и интерпретации стационарных газодинамических исследований скважин по индикаторной кривой, позволяющий учитывать дополнительную априорную информацию о пластовом давлении и коэффициентах фильтрационного сопротивления.
2. На примерах интерпретации данных газодинамических исследований двух газовых скважин Уренгойского газоконденсатного месторождения показано, что предложенный метод, моде-

Таблица 2. Результаты обработки ИК скважин № 1, № 2 Уренгойского газоконденсатного месторождения

Table 2. Results of processing indicator diagram of wells no. 1, 2 of the Urengoy gas condensate field

Номер режима исследования Number of testing mode	Скважины/Wells	Метод Method	Оценки коэффициентов фильтрационного сопротивления a' , b' Estimates of filtration resistance coefficients a' , b'		Оценки пластового давления $p_{nm}^* = \alpha'_{1,n}(\beta_n^*)$, атм Estimates of reservoir pressure $p_{nm}^* = \alpha'_{1,n}(\beta_n^{**})$, атм
			$a' = \alpha'_{2,n}(\beta_n^*)$, атм ² /(тыс. м ³ /сут) $a' = \alpha'_{2,n}(\beta_n^*)$, атм ² /(10 ³ м ³ /D)	$b' = \alpha'_{3,n}(\beta_n^*)$, атм ² /(тыс. м ³ /сут) ² $b' = \alpha'_{3,n}(\beta_n^*)$, атм ² /(10 ³ м ³ /D) ²	
2	1	ИМ ИМ	86,82	0,05	296,95
		ИМ ИМ	15,54	0,28	223,61
3	1	ИМ ИМ	79,59	0,07	296,92
		НК НК	0,81	0,18	272,15
	2	ИМ ИМ	19,34	0,26	223,63
		НК НК	45,73	0,19	229,25
4	1	ИМ ИМ	39,61	0,19	296,67
		НК НК	-530,97	0,27	125,86
	2	ИМ ИМ	16,41	0,27	223,59
		НК НК	5,40	0,30	221,03
5	1	ИМ ИМ	65,66	0,12	297,13
		НК НК	136,86	0,03	320,24
	2	ИМ ИМ	17,89	0,27	223,62
		НК НК	21,79	0,26	224,57
6	1	ИМ ИМ	92,90	0,06	297,90
		НК НК	280,48	-0,15	359,5

ли и алгоритмы идентификации и интерпретации позволяют определять пластовое давление, повысить точность оценок коэффициентов фильтрационного сопротивления, сократить время проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов. – М.: Недра, 1984. – 269 с.
2. Horne R.N. Modern well test analysis. A computer-aided approach. – Palo Alto, California: Petroway, inc., 2000. – 257 p.
3. Руководство по исследованию скважин / А.И. Гриценко, З.С. Алиев, О.М. Ермилов, В.В. Ремизов, Г.А. Зотов. – М.: Наука, 1995. – 523 с.
4. Алиев З.С., Зотов Г.А. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин. – М.: Недра, 1980. – 301 с.
5. Гасумов Р.А., Толпаев В.А., Ахмедов К.С. Методика обработки данных гидродинамических исследований скважин // Нефтепромысловое дело. – 2011. – № 3. – С. 8–11.
6. Эрлагер мл.Р. Гидродинамические методы исследования скважин. – Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 512 с.
7. Кременецкий М.И., Ипатов А.И. Гидродинамические и промыслово-технологические исследования скважин. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 476 с.
8. Васильев Ю.Н., Дубинина Н.И. Математические основы обработки результатов газодинамических исследований скважин. – М.: ООО «НЕДРА – Бизнесцентр», 2008. – 116 с.

9. Карнаузов М.Л., Пьянкова Е.М. Современные методы гидродинамических исследований скважин: справочник инженеров по исследованию скважин. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 432 с.
10. Гидродинамические исследования скважин / П.В. Мангазеев, М.В. Панков, К.Е. Кулагина, М.Р. Камардинов, Т.А. Деева. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 340 с.
11. Лапшин В.И. Интерпретация результатов газодинамических исследований скважин (при установившемся режиме фильтрации) // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2015. – № 3 (23). – С. 36–41.
12. Оптимизация газодинамических исследований на газовых месторождениях А.В. Нурмакин, А.Н. Лапердин, С.Г. Кочетов, А.С. Епрынецев // Научно-технический журнал «Геология, география и глобальная энергия». – 2011. – № 41. – С. 186–189.
13. Вяхирев Р.И., Коротаев Ю.П., Кабанов Н.И. Теория и опыт добычи газа. – М.: Недра, 1998. – 479 с.
14. Гидродинамические исследования скважин и методы обработки результатов измерений / Р.С. Хисамов, Э.И. Сулейманов, Р.Г. Фархуллин, О.А. Никашев, А.А. Губайдуллин, Р.К. Иш-каев, В.М. Хусаинов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1999. – 227 с.
15. Айрапетов А.Л. Уточнённый метод обработки результатов ГДИ вертикальных газовых скважин последовательной сме-

- ной установившихся отборов // Сборник трудов 69-й Международной молодежной научной конференции нефти и газа / Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина. – М., 2015. – С. 1826.
16. Houpert A. On the flow of gases in porous media // Revue de L'Institut Francais du Petrole. – 1959. – № 14 (11). – P. 1468–1684.
17. Al-Hussainy R., Ramey Jr.H.J., Crawford P.B. The flow of real gases through porous media // J. Pet. Technol. – 1966. – № 18 (5). – P. 624–636.
18. Rawlins E.L., Schellhardt M.A. Back pressure data on natural gas wells and their application to production practices. – USA, 1936. – 210 p.
19. Сергеев П.В., Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации гидродинамических исследований скважин с учетом априорной информации // Современные гидродинамические исследования скважин: труды международного форума исследователей скважин и второй научно-практической конференции. – М.: Институт нефтегазового бизнеса, 2004. – С. 188–196.
20. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.
21. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

Поступила 04.11.2015 г.

UDC 519.688: 622.276

IDENTIFICATION METHOD OF INDICATOR DIAGRAM BY INTERPRETING THE MEASURED RESULTS OF GAS-DYNAMIC WELL TESTING

Phuong T.H. Nguyen,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: nguyenphuongtpu1512@gmail.com

Viktor L. Sergeev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: SergeevVL@ignd.tpu.ru

The relevance of this work is caused by the need to increase informativeness of the results of gas-dynamic well testing in stabilized flow conditions, to reduce the number of modes, duration of testing and gas emissions into the atmosphere.

The main aim of the study is to develop a method for identification and interpretation of the measured results of gas-dynamic well testing by indicator diagram allowing to take into account additional prior information, improve the accuracy of determining the reservoir pressure and flow parameters, reduce the time of testing.

The methods used in the study are the theoretical and practical developments in gas-dynamic well testing, system analysis, system identification, optimization of functions and linear algebra. The proposed method is based on using an integrated systems models of indicator diagram with a priori information and expert assessments of reservoir pressure and filtration reservoir parameters. Defining the parameters of the model of indicator diagram, which is represented by the binomial Forchheimer filtering law, and the control parameters that determine the importance (weight) of the expert assessments carried out by solving two optimization problems using quadratic quality indicators. For approbation of the method used production data of stabilized gas-dynamic well testing by indicator diagram and expert assessments of reservoir pressure and filtration reservoir parameters of the gas-condensate field in Tyumen region.

The results. The authors proposed to develop a method for identification and interpretation of the measured results of gas-dynamic well testing by indicator diagram, which allows to take into account additional prior information, to determine most accurately the formation pressure and filtration resistance coefficients. The results of data processing of gas-dynamic well testing by indicator diagram have shown that the method can improve the accuracy of determining the reservoir pressure, filtration resistance coefficients, reduce the number of modes and duration of testing.

Key words:

Identification, interpretation, gas-dynamic well testing, indicator diagram, integrated systems models, a priori information, gas-condensate fields.

REFERENCES

- Buzinov S.N., Umrikhin I.D. *Issledovanie neftyanykh i gazovykh skvazhin i plastov* [Study of oil and gas wells and reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 269 p.
- Horne R.N. *Modern well test analysis. A computer-aided approach*. Palo Alto, California, Petroway, inc., 2000. 257 p.
- Gritsenko A.I., Aliev Z.S., Ermilov O.M., Remizov V.V., Zotov G.A. *Rukovodstvo po issledovaniyu skvazhin* [Well test guide]. Moscow, Nauka Publ., 1995. 523 p.
- Aliev Z.S., Zotov G.A. *Instruktsiya po kompleksnomu issledovaniyu gazovykh i gazokondensatnykh plastov i skvazhin* [Instruction of complex well test of gas and gas-condensate fields]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 301 p.
- Gasumov R.A., Tolpaev V.A., Akhmedov K.S. Metodika obrabotki dannykh gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin [Methods of analysis of well test data]. *Neftepromyslovoe delo*, 2011, no. 3, pp. 8–11.
- Erlager R. (jr.). *Gidrodinamicheskie metody issledovaniya skvazhin* [Methods of well test]. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Sciences Press, 2006. 512 p.
- Kremenetskiy M.I., Ipatov A.I. *Gidrodinamicheskie i promyslovo-tehnologicheskie issledovaniya skvazhin* [Hydrodynamic and industrial and technological research of wells]. Moscow, MAKS Press, 2008. 476 p.
- Vasilev Yu.N., Dubinina N.I. *Matematicheskie osnovy obrabotki rezultatov gazodinamicheskikh issledovaniy skvazhin* [Mathematical foundations of processing the results of gas-dynamic well testing]. Moscow, Nedra-Biznessentr Publ., 2008. 116 p.
- Karnaukhov M.L., Pyankova E.M. *Sovremennye metody gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin: spravochnik inzhenerov po issledovaniyu skvazhin* [Modern methods of well test: manual for engineers]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2010. 432 p.
- Mangazeev P.V., Pankov M.V., Kulagina K.E., Kamardinov M.R., Deeva T.A. *Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin* [Well test]. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. 340 p.
- Lapshin V.I. Interpretatsiya rezultatov gazodinamicheskikh issledovaniy skvazhin (pri ustanovivshemsya rezhime filtratsii) [Interpretation of the results of gas well testing (in stabilized flow conditions)]. *Nauchno-tehnicheskiiy sbornik «Vesti gazovoy nauki»*, 2015, no. 3 (23), pp. 36–41.
- Nurmakin A.V., Laperdin A.N., Kochetov S.G., Epryntsev A.S. Optimizatsiya gazodinamicheskikh issledovaniy na gazovykh mestorozhdeniyakh [Optimization of gas dynamic well test of gas fields]. *Geology, geography and global energy*, 2011, no. 41, pp. 186–189.
- Vyakhirev R.I., Korotaev Yu.P., Kabanov N.I. *Teoriya i opyt dobychi gaza* [Theory and experience of gas exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 479 p.
- Khisamov R.S., Suleymanov E.I., Farkhullin R.G., Nikashev O.A., Gubaydullin A.A., Ishkaev R.K., Khusainov V.M. *Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin i metody obrabotki rezultatov izmereniy* [Well test and methods of processing the measured results]. Moscow, VNIIOENG Press, 1999. 227 p.
- Ayrapetov A.L. Utochnennyy metod obrabotki rezultatov GDI vertikalnykh gazovykh skvazhin posledovatelnoy smenoy ustanovivshikhsya otborov [The corrected method for interpretation of well tests of vertical gas wells]. *Sbornik trudov 60 Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii nefti i gaza* [Proc. 69th Int. Youth Scien. Conf. of Oil and Gas]. Moscow, 2015. pp. 18–26.
- Houpert A. On the flow of gases in porous media. *Revue de L'Institut Francais du Petrole*, 1959, no. 14 (11), pp. 1468–1684.
- Al-Hussainy R., Ramey Jr.H.J., Crawford P.B. The flow of real gases through porous media. *J. Pet. Technol.*, 1966, no. 18 (5), pp. 624–636.
- Rawlins E.L., Schellhardt M.A. *Back pressure data on natural gas wells and their application to production practices*. USA, 1936. 210 p.
- Sergeev P.V., Sergeev V.L. Integrirovannye sistemy identifikatsii gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin s uchedom apriornoy informatsii [Integrated systems identification of well test with a priori information]. *Trudy mezhdunarodnogo foruma issledovateley skvazhin i vtoroy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin»* [Proc. of 2nd scient.-prac. confer. of int. forum of well testing researchers]. Moscow, Institute of oil and gas business Press, 2004. pp. 188–196.
- Sergeev V.L. *Integrirovannye sistemy identifikatsii* [Integrated systems of identification]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 198 p.
- Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in the examples and problems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 544 p.

Received: 4 November 2015

УДК 622.271

ОЦЕНКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА АДАПТАЦИИ ВНУТРЕННЕГО ОТВАЛООБРАЗОВАНИЯ К РЕЖИМУ ДЕЙСТВУЮЩИХ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Селюков Алексей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ
Горного института Кузбасского государственного технического
университета им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово,
ул. Весенняя, 28. E-mail: alex-sav@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена развитием технической оснащенности и масштабов открытой угледобычи в Кемеровской области при ограничении земель сельскохозяйственного назначения. На основе использования специального метода горно-геометрического анализа карьерного поля (определение параметров этапов-очередей отработки) и технологического конструирования систем разработки создаются технологии отработки месторождений очередями при изменении направления подвигания фронта горных работ. При этом на первом этапе-очереди подвигание уступов производится вкрест простирания пластов до определенной промежуточной глубины разработки с преимущественно внешним отвалообразованием вскрышных пород, а на втором этапе-очереди отработки – по простиранию пластов до конечной глубины разработки с преимущественно внутренним отвалообразованием. Данные технологии получили название гибких благодаря динамическому подходу к определению границы между этапами-очередями для каждого конкретного месторождения.

Цель работы. Модернизация пространственно-планировочных решений по организации технологического процесса внутреннего отвалообразования вскрышных пород на действующих карьерных полях.

Методы исследования. Совмещенный анализ проектных и фактических данных о современном состоянии внутреннего отвалообразования при разработке наклонных и крутопадающих залежей в Кемеровской области, специальные методы горно-геометрического анализа карьерных полей во взаимосвязке с конструктивно-параметрическими проработками и технико-экономический анализ предложенных решений с использованием электронных таблиц Excel.

Результаты. Предложены рациональные варианты формирования внутриконтурных отвалов в процессе преобразования углубочных продольных в поперечные системы открытой разработки, за счет чего обеспечивается более эффективное получение технологических и экологических преимуществ внутреннего отвалообразования на всех очередях отработки с размещением того или иного промежуточного внутриконтурного отвала.

Ключевые слова:

Открытые горные работы, структурные схемы разработки, внутреннее отвалообразование, карьерное поле, угольные разрезы.

В практике производства открытой угледобычи в Кемеровской области, начиная с момента ввода в эксплуатацию первых угольных разрезов «Бачатский», «Краснобродский» и других, преимущественно имела место углубочная продольная одноили двухбортная система разработки наклонных и крутопадающих залежей – по классификации академика В.В. Ржевского [1]. На рис. 1 представлено распределение систем разработки по количеству участков открытой угледобычи в Кемеровской области. Такой способ производства открытых горных работ (позиции 1 и 2, рис. 1) приводит к повышению темпа отчуждения земель, которые подчас важны для сельскохозяйственного назначения [2, 3] (землеемкость открытых горных работ в Кузбассе превосходит среднеотраслевые показатели в 3 раза и достигает 45–50 Га/млн т). Вместе с тем в последнее десятилетие в проектной документации стали появляться технологические решения, направленные на снижение негативных последствий открытых горных работ. К числу таких проектных решений можно отнести внедрение продольных блоковых систем разработки (позиция 3, рис. 1). Сущность технологии состоит в делении карьерного пространства на блоки, из которых первоначальный обрабатывается до проектной глубины и размещение вскрышных пород производится на вне-

пшем отвале, а затем, по мере образования выработанного пространства, последующие блоки обрабатываются с размещением вскрыши в образовавшемся пространстве предыдущего [4].

При использовании таких систем разработки объемы внутреннего отвалообразования ограничены или отсутствуют полностью, происходит пикообразный рост вскрышных объемов, дальности транспортирования и отторжения земельных ресурсов протекает прогрессирующими темпами. При блоковой системе разработки доля складирования вскрышных пород во внутреннем отвале несколько выше и может фактически достигать 15 %, однако Б.Т. Рутковский определяет долю внутреннего отвала в общекарьерном объеме вскрыши до 20–30 % [4]. Такой дисбаланс пропорций внешнего и внутреннего отвалообразования поясняется следующим фактом. Угольные разрезы Кемеровской области эксплуатируются несколько десятков лет, вместе с тем единичное внедрение блоковой продольной системы разработки осуществляется в последнее время, что и приводит к сокращению долевого участия размещения вскрыши в выработанном пространстве.

В этой связи очевидно, что важной производственной задачей является изыскание технологических решений, обеспечивающих снижение эко-



Рис. 1. Распределение видов систем открытой разработки по количеству карьерных полей угольных разрезов Кемеровской области

Fig. 1. The distribution of the types of open development systems by the number of mining fields of the Kemerovo region

логической нагрузки на окружающую природную среду и повышение ресурсосбережения горного производства: при размещении вскрышных пород в выработанном пространстве, сокращении площадей под внешние отвалы. Если этого не предусмотреть в настоящее время, то все угольные разрезы в ближайшие десятилетия будут ограничены собственными внешними отвалами вскрышных пород и их развитие будет проблематичным.

На рис. 2 представлен комплексный анализ проектной документации в части укрупненного формирования внешних отвалов вскрышных пород угольных разрезов Кемеровской области:

- на угольном разрезе имеются от одного до нескольких отвалов;
- территориальное расположение внешних отвалов: по периметру вдоль длинной оси карьерного поля; по периметру в торце карьерного поля; смешанное расположение отвалов, как по периметру вдоль длинной оси карьерного поля, так и в торце (рис. 2, а);
- развитие контуров отвалов: направленное в сторону карьерного поля; в противоположную сторону от карьерного поля; комбинированное направление развития контуров внешнего отвала (рис. 2, б).

По анализу производственной работы и проектной документации можно заключить следующее: контурное развитие внешних отвалов вскрышных пород на угольных разрезах Кемеровской области направлено в сторону карьерного поля и по количественному распределению значительная доля приходится на расположение внешних отвалов по периметру карьерного поля. Тогда следует отметить, что в перспективе для подавляющего большинства угольных разрезов будет ограничено развитие контуров карьерного поля в части пространственного расположения

внешних отвалов вскрышных пород на территории горного отвода.

Из ряда научных публикаций [5–10] известно, что при разработке наклонных и крутопадающих угольных залежей могут применяться следующие виды поперечных систем разработки: углубочно-сплошная, поэтапно-углубочная, блочно-слоевая, челочно-слоевая. Эти системы разработки характеризуется двумя этапами развития горных работ: 1) формирование первоначальной емкости в границах карьерного поля для внутренних отвалов; 2) отработка основной части карьерного поля со складированием вскрышных пород в выработанном пространстве карьера.

В вышеупомянутых источниках научно-технической литературы и во многих других, посвященных данному направлению, многократно и доказательно подтверждалась эффективность использования выработанного пространства карьерного поля для складирования вскрышных пород.

На современном уровне развития открытых горных работ за рубежом признано, что наиболее рациональное соотношение технологии и окружающей среды достигнуто в практике работы угольных разрезов США, Канады, Великобритании, Франции. Этому способствуют наименее благоприятные условия открытого способа разработки с точки зрения экологии и горного окружения. Факторами, оказывающими ограничения на развитие открытых горных работ, являются: отсутствие свободных земель; большая плотность населения; развитое сельское хозяйство; развитая инфраструктура коммуникаций; наличие ценных, с исторической, эстетической и природной точек зрения, ландшафтов.

В таких условиях предпочитают технологии, позволяющие иметь минимум нарушенных площадей земной поверхности и производить рекультивацию одновременно с разработкой.

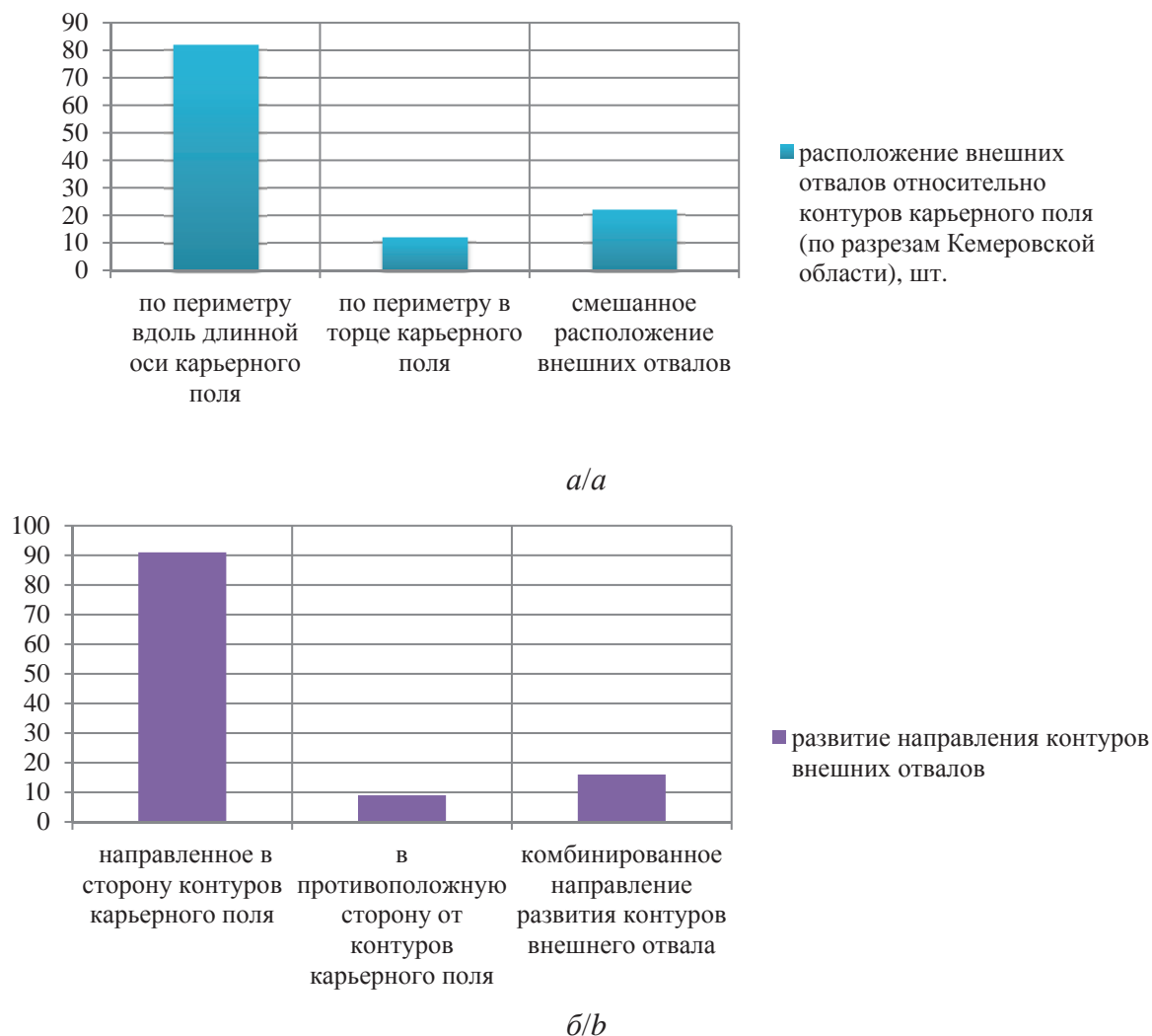


Рис. 2. Оценка месторасположения (а) и направление развития контуров внешних отвалов вскрышных пород (б) на угольных разрезах Кемеровской области

Fig. 2. Evaluation of the location (a) and the direction of the development of the contours of the external overburden dumps (b) at open-pit coal mines of the Kemerovo region

В зарубежных источниках уже с конца прошлого века [11–16] приводится много примеров практического применения однобортовой поперечной системы разработки с внутренним отвалообразованием на месторождениях угля и отмечаются ее достоинства: нарушаемая горными работами площадь земель и время ее отторжения минимальны; сокращение расстояния транспортирования пород до минимального за счет компактного построения зоны рабочего борта и отвала в карьере; преимущественно внутреннее отвалообразование в основной период работы карьера; ускоренная рекультивация земель (начало через 5–6 лет после начала разработки) со скоростью последующего восстановления, равной скорости отторжения; высокая полнота извлечения запасов за счет разработки пластов только с всячего бока и регулирования высоты подступов.

В табл. 1 приведены примеры применения поперечной системы разработки в зарубежных стра-

нах. Для небольших угольных месторождений Франции характерно применение однобортовой поперечной системы разработки с минимальным размером рабочей зоны и внутренним отвалообразованием. Месторождения имеют 5–6 пластов угля наклонного или крутого падения, осложненных нарушениями.

Пример применения однобортовой поперечной системы в США – карьер KEMMERER мощностью 3,2 млн т, разрабатывающий свиту из 12 пластов наклонного падения (22–25°) мощностью 3–30 м. Глубина работ достигает 300 м, коэффициент вскрыши 4,6 м³/т.

На антрацитовых месторождениях восточного побережья США поперечная система запроектирована на месторождениях со сложной геологией. Глубина разработки составляет 250–280 м.

В Канаде поперечная система разработки применяется на группе карьеров (3 карьера) компании QUINTETTE GOAL со сложной геологией и

горным рельефом. Углы падения свит из 5–8 пластов мощностью 0,7–9,5 м меняются в пределах 15–70°. Выемка пород и угля ведется комплектом гидравлических экскаваторов. Мощность карьеров 1–5 млн т, коэффициент вскрыши 3,5–6,4 м³/т, срок работы до 20 лет. Отвалообразование преимущественно внутреннее.

Самым крупным в мире карьером с поперечной системой разработки является совместное предприятие (США и Колумбия) GERRE ON в Колумбии с годовой производительностью по полезному ископаемому до 15 млн т угля в год. На карьере разрабатывается до 40 наклонных пластов угля с диапазоном залегания 10–35°, мощностью 1–10 м. Максимальная глубина разработки 225 м при ширине карьера 2 км. Длина первоначального этапа разработки составляет 10 км с запасами более 300 млн т. Коэффициент вскрыши 5–6 м³/т. Отвалообразование после шестого года разработки внутреннее с параллельным ведением рекультивации.

В настоящее время отдельные элементы таких систем разработки находят применение при составлении проектной документации разрезов «Кедровский», «Краснобродский», «Виноградовский» и др. Однако, как показывают данные по проек-

там, внедрение в проектную практику происходит не с позиции их комплексной реализации, а лишь фрагментарно. Крупным недостатком внедрения систем разработки с внутренним отвалообразованием в проектную практику является следующий момент: реализация должна сопровождаться дополнительным обоснованием их параметров и области эффективного применения относительно конкретных горно-геологических и технологических условий действующего производства, т. е. должны дополнительно выполняться конструктивно-параметрические проработки применительно к условиям действующего разреза.

В качестве одного из решений данной проблемы может быть предложена поэтапная трансформация углубочных продольных в поперечные системы разработки для режима действующих разрезов Кемеровской области. Отличительными признаками от ранее известных работ в данной области исследования является предложенное в авторской интерпретации детализированное поэтапное преобразование конструкции рабочей зоны карьерного поля при адаптации режимов отсыпки внутриконтурных отвалов [17]. Как уже отмечалось, процесс преобразования одного вида системы

Таблица 1. Примеры применения поперечной системы разработки в зарубежных странах

Table 1. Examples of the application of cross-cut system development in foreign countries

Карьер, страна Quarry, country	Запасы, млн т Reserves, mln t	Площадь горного отвода, Га Mining allotment area, Ha	Количе- ство пла- стов Number of layers	Мощность пластов, м Thickness of layers, m	Угол падения пластов, град. Angle of inci- dence of lay- ers, grad.	Мощность карьера, млн т/год Quarry output, million tons per year	Коэффици- ент вскры- ши, м ³ /т Stripping ratio, m ³ /t	Глуби- на, м Depth, m
Westfield, Великобритания Westfield, UK	20	372	6	–	10–45	–	15,3	206
Nant Helen, Великобритания Nant Helen, UK	3,3	308	13	0,2–3,5	0–10	–	22	146
Park Slip Extension, Великобритания Park Slip Extension, UK	2,3	179	23	0,2–1,1	0–10	0,3	19	120
Ffos Las, Великобритания Ffos Las, UK	3,3	423	11	0,2–5,5	0–7	–	19	140
Keekle Ektension, Великобритания Keekle Ektension, UK	2,1	320	16	0,1–1,7	1–4	0,23	21	120
Keekle Ektension, Великобритания Keekle Ektension, UK	2,1	320	16	0,1–1,7	1–4	0,23	21	120
Dalguhandy, Великобритания Dalguhandy, UK	15	1046	16	0,2–1,9	1–10	1,0	15	110
Herauld, Франция Herauld, France	3,9	–	8	2–6	70	0,2	6	–
Gerrejón, Колумбия Gerrejón, Colombia	300	3800	40	1–10	10–35	до 15	5–6	225
Kemmerer, США Kemmerer, USA	–	–	10	3–30	25–30	3,2	4,6	–
Saxonvale, Австралия Saxonvale, Australia	4700	–	11	2–20	5–20	до 7	4,5	300
Mesa, Канада Mesa, Canada	22	–	5	1–9	22–40	5,3	5,6	200
Wolverine, Канада Wolverine, Canada	–	–	8	0,7–4,3	15–27	1	–	240

разработки в другой конструктивно представлен с помощью трансформации рабочей зоны карьерного поля.

Реализация технических решений основывается на следующих иерархических уровнях:

I – основные виды поперечных систем разработки;

II – этапы развития горных работ при поперечных системах разработки (подготовка емкости под внутренний отвал с учетом выработанного пространства и отработка основной части поля с преимущественным внутрикарьерным отвалообразованием);

III – направление подвигания фронта вскрышных и добычных работ при комбинированном сочленении систем разработки (в профиле и плане карьерного поля);

IV – конструкция забойной и отвальной сторон карьерного поля (в угленасыщенной и безугольной зонах).

К дополнительным иерархическим уровням и признакам, ранее не упоминавшимся в работах [17–19] и детализирующим процесс адаптации, автором устанавливается разбивка карьерного поля технологическими этапами, как в профиле, так и в плане горных работ: А – продольная углубочная система разработки (выработанное пространство); В – контуры емкости под внутренний отвал; А1 – зона оставшейся части карьерного поля, где могут производиться горные работы в период сооружения емкости под отвал; С – основная (оставшаяся после сооружения выработки под внутренний отвал) часть карьерного поля.

С учетом применимости дополнительных признаков для условий действующих карьерных полей угольных разрезов Кемеровской области и параметров залегания свит наклонных и крутых угольных пластов выявлены природно-технологические формы и варианты размещения выработок для внутреннего отвала:

- трапециевидная форма при двухбоковой рабочей зоне;
- треугольная форма при однобоковой рабочей зоне;
- трапециевидная форма при однобоковой рабочей зоне;
- линейно-косоугольная форма;
- криволинейно-замкнутая или разомкнутая форма;
- последовательно сдвоенные, строенные и т. п.

Эти вышеназванные формы карьерных полей образуют в совокупности пространственную форму первоначальной горной выработки по типу тех или иных угольных залежей Кузбасса.

Следует отметить, что залежи различаются, в числе прочих факторов, по геометрической форме, линейным размерам карьерного поля в поперечном сечении и по структурным признакам (параметрам) рабочей зоны; в данном случае во взаимосвязи с названными факторами находятся и структурные решения для этапов производства работ.

На рис. 3 при учете основных факторов горно-геометрических признаков и параметров карьерных полей предложена систематизация форм и вариантов размещения первоначальных выработок под внутренний отвал на действующих разрезах Кузбасса. Относительно структурного наполнения систематизации предлагаются конструктивно-планировочные и организационные решения по реализации размещения внутренних отвалов в режиме действующих карьерных полей угольных разрезов [5].

Сущность углубочно-сплошной системы разработки. В одном из торцов залежи от текущей глубины сооружают карьер ограниченных размеров до проектной глубины – так называемый карьер первой очереди. Основное его назначение – создание первоначальной емкости для размещения вскрышных пород при отработке оставшейся части залежи. Карьер первой очереди сооружают с формированием нерабочих бортов в торцевой и боковых частях карьерной выемки, а с противоположной торцевому борту стороны формируют рабочий борт карьера. После завершения строительства карьера первой очереди производят отработку оставшейся части залежи по простиранию с размещением пород вскрыши в выработанное пространство.

Перемещение пород осуществляют транспортными средствами по бермам, а полезное ископаемое (уголь) вывозят на поверхность в места складирования и переработки. Поскольку сооружение карьера первой очереди может вестись по различным уровням (I–IV), то с целью минимизации объема вскрышных пород, вывозимых на внешние отвалы, параметры карьера должны быть также наименьшими, за исключением глубины. После сооружения карьера первой очереди осуществляется переход на технологию с внутренним отвалообразованием.

Основными достоинствами системы разработки, по сравнению с традиционной продольной углубочной, являются: меньшая землеемкость угледобычи вследствие размещения части вскрышных пород в выработанном пространстве; снижение длины транспортирования вскрышных пород; возможность отработки всех пластов свиты со стороны всячего бока, позволяющая снизить потери угля в недрах. К недостаткам этой технологии следует отнести ограниченность фронта горных работ и жесткую взаимозависимость забойной и отвальной зон. Рассмотренная ранее поперечная система разработки с карьером первой очереди хотя и повышает эффективность открытого способа угледобычи по сравнению с традиционной, однако также имеет ряд существенных недостатков. Наиболее значительный из них – необходимость строительства карьера первой очереди до граничной глубины, что удлиняет срок перехода на внутреннее отвалообразование и вызывает нарушение значительных площадей земной поверхности внешними отвалами. Кроме того, возникают затруднения

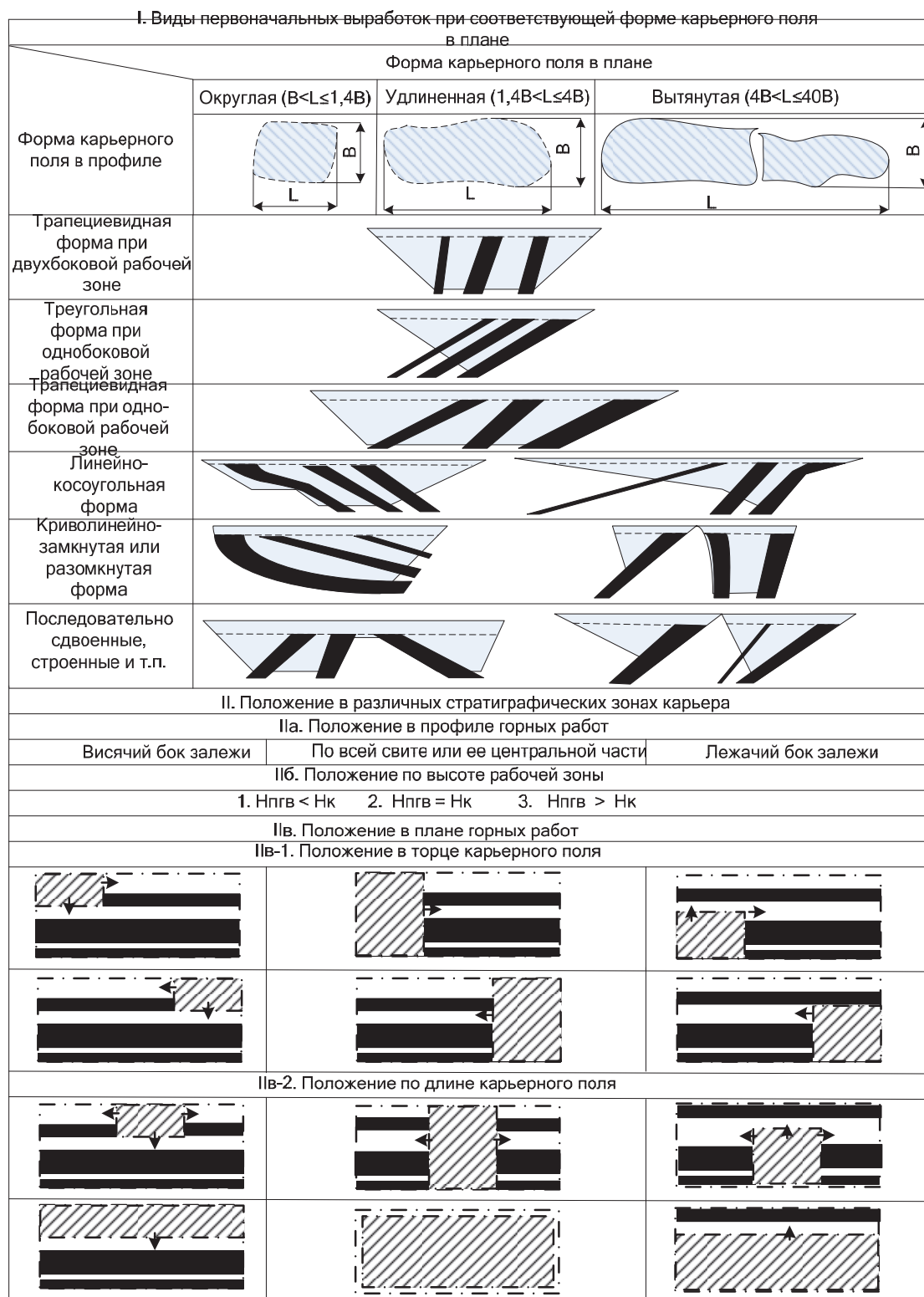


Рис. 3. Систематизация форм и вариантов размещения первоначальных выработок под внутренний отвал на действующих разрезах Кузбасса: H_k – конечная глубина карьерного поля; $H_{пгв}$ – глубина первоначальной горной выработки (емкости под внутренний отвал); L – длина залежи по простиранию; B – ширина залежи вкрест простирания; - - - - - конечный контур карьерного поля; – конечный контур первоначальной горной выработки

Fig. 3. Systematization of the forms and properties of the location of initial internal workings under internal dumps in existing coal mines of Kuzbass: H_k – the final depth of the mining field; $H_{пгв}$ – the initial depth of excavation (internal dump capacity); L – the length of the deposit along strike; B – the width of the deposits across the stretch; - - - - - the final outline of mining fields; – the final circuit of the original mine workings

с реконструкцией карьера при изменении его граничных контуров.

Сущность поэтапно-углубочной системы разработки. В одном из торцов угольной залежи сооружают от текущей глубины котлован вкрест простирания залежи на глубину, равную высоте уступа. Порода вскрыши вывозят на внешний отвал. После сооружения котлована породу от разработки первого горизонта размещают в выработанном пространстве. Последующую углубку карьера производят при отгонке верхнего (первого) уступа на величину, определяемую исходя из возможности размещения пород вскрыши от углубки на нижележащий горизонт на поверхности внутреннего отвала. Углубка горных работ ведется до проектной глубины карьера. После этого рабочая зона становится постоянной и вся порода вскрыши перемещается во внутренний отвал.

Угол углубки изменяется в пределах 16–18°, что определяет устойчивость внутреннего отвала и время достижения граничной глубины карьера, при которой начинается отработка залежи с полным размещением вскрышных пород во внутренний отвал. Использование данной системы разработки позволяет сократить объемы вскрышных пород, размещаемых на внешних отвалах, и снизить землеемкость угледобычи. Сокращаются также сроки строительства карьера и перехода на технологию с внутренним отвалообразованием. При отработке нижнего горизонта возможно применение бестранспортной технологии. Появляется возможность рекультивации выработанного пространства вслед за продвижением фронта горных работ, что обеспечивает снижение негативного влияния карьера на окружающую среду. Существенным недостатком является консервация части запасов при углубке горных работ. Возможная область применения – отработка свит угольных пластов наклонного и крутого падения большой протяженности по простиранию.

Отличительная особенность блочно-слоевой системы разработки – деление всего месторождения по простиранию на блоки, включающие карьер первой очереди, и блоки, обрабатываемые на внутренний отвал. Отработку месторождения начинают с сооружения карьера первой очереди, причем его параметры устанавливают исходя из возможности размещения в создаваемой горной выработке всех пород вскрыши соседнего блока. Параметры блока определяют согласно следующим положениям. Принимается, что один блок обрабатывается в течение одного года. При этом обеспечивается производственная мощность карьера. Мощность горизонтального слоя в блоке устанавливается по условиям минимума потерь и разубоживания при отработке угольных пластов свиты. Слои в блоке обрабатывают последовательно в нисходящем порядке, начиная с верхнего горизонта. Пласты свиты обрабатывают экскаваторами типа прямая и обратная лопата со стороны висячего бока, что позволяет снизить потери угля

и разубоживание его породой. Укладку пород вскрыши в выработанное пространство осуществляют погоризонтно, начиная с нижнего выработанного слоя, или наклонными слоями под углом естественного откоса, отсыпаемыми по мере отработки. Положительными качествами технологии являются: обеспечение благоприятных условий извлечения всех пластов свиты; размещение пород вскрыши в выработанном пространстве; высокая маневренность горного оборудования в пределах слоя. К недостаткам следует отнести нестабильность текущего коэффициента вскрыши в течение года и большой объем вскрышных пород, вывозимых на внешние отвалы. Возможная область применения технологии – месторождения, представленные свитами угольных пластов сложного строения и залегания при достоверно установленных границах карьера.

Сущность челночно-слоевой системы разработки заключается в отработке месторождения горизонтальными слоями с разнонаправленным продвижением фронта работ и размещением всех пород вскрыши в выработанном пространстве. Отработку месторождения начинают с сооружения в одном из торцов карьерного поля поперечной карьерной выемки на глубину обрабатываемого слоя, определяемого по критерию транспортной работы при сравнении бестранспортной и транспортной технологий отработки породной части слоя. Вскрышные породы размещаются на поверхности карьерного поля. Возможная мощность обрабатываемого слоя достигает 100 м. Ширина выработки устанавливается исходя из возможности размещения пород вскрыши при отработке слоя в выработанном пространстве. Длину выработки по дну принимают равной горизонтальной мощности обрабатываемой залежи (свиты). После сооружения поперечной карьерной выемки в одном из торцов залежи начинают отработку оставшейся части горизонтального слоя. Отработку слоя производят одним высоким уступом с разбивкой его по высоте на подступы. Перемещение вскрышных пород во внутренний отвал ведут путем перевалки с помощью драглайнов, т. е. по бестранспортной технологии. Выемку угольных пластов осуществляют гидравлическими экскаваторами с отгрузкой породы в сторону выработанного пространства с последующей переэкскавацией драглайнами во внутренний отвал. Отработку слоя ведут подступами в нисходящей последовательности, начиная с верхнего. Отработку подступа выполняют поперечными экскаваторными заходками с опережающей выемкой угольных пластов свиты гидравлическими экскаваторами типа обратная лопата. После отработки первого слоя подготавливают к отработке нижележащий слой. Для этого в первом слое породу с помощью транспортных средств перемещают на поверхность внутреннего отвала. Таким образом, создается пространство для сооружения поперечной карьерной выемки для подготовки к отработке нижележащего слоя (горизонта). При этом соору-

жение подготовительной выработки ведут с вывозкой пород вскрыши также на поверхность внутреннего отвала. После сооружения подготовительной углубочной горной выработки на втором горизонте производят отработку второго горизонта (слоя) с размещением пород вскрыши в выработанном пространстве этого же горизонта. Порода вскрыши из внутреннего отвала первого горизонта перемещают во внутренний отвал того же горизонта на поверхность внутреннего отвала нижележащего слоя. Таким способом направление подвигания фронта работ меняется на противоположное, т. е. отработка нижнего слоя ведется в обратную сторону. После отработки второго слоя осуществляют, при необходимости, углубку на третий горизонт (слой) с соблюдением всех технологических операций, указанных при углубке на второй горизонт, и изменением подвигания фронта работ на противоположное направление. В такой последовательности отработку месторождения ведут до горизонта, на котором достигается равенство слоевого коэффициента вскрыши граничному. Особенностью челночно-слоевой системы разработки является наличие одного добычного слоя. Отработанные вышележащие слои представляют собой внутренние отвалы, периодически переэкскавируемые из одного положения в другое по мере отработки нижележащих породугольных слоев. Положительные стороны: отсутствие внешних отвалов, что снижает землеемкость угледобычи; использование бестранспортной технологии при отработке породугольного слоя, а следовательно, снижение затрат на добычу угля; размещение всех пород вскрыши в выработанном пространстве, что обуславливает сокращение длины транспортирования и снижение транспортных расходов. Отрицательные стороны: необходимость многократной перевалки вскрышных пород внутреннего отвала, что приводит к увеличению текущего коэффициента вскрыши; жесткая взаимозависимость отработки подступов обрабатываемого слоя. Возможной областью применения челночно-слоевой технологии являются угольные залежи большой протяженности по простиранию и высокой угленасыщенности.

На основе комплексного учета: пространственного развития горных работ в рабочей зоне действующего разреза (выработанное пространство), запасов полезного ископаемого (угленосность свиты), годовой производственной мощности, текущего коэффициента вскрыши и других факторов, разработан «механизм» адаптации систем разработки с внутренним отвалообразованием посредством укрупненного алгоритма выбора технологии внутреннего отвалообразования и оценки ее влияния на технико-экономические показатели после реализации предложенных решений [20]. В рамках реализации предложенных решений внедрения поперечных систем разработки в производственные системы разработана компьютерная программа в среде Excel.

Программа включает многостадийный подход к процессу трансформации углубочной продольной одно- или двухбортовой системы разработки в поперечную сплошную:

- оценка состояния горных работ на угольном разрезе (по ключевым параметрам и показателям производственной деятельности);
- процесс технологического формирования того или иного вида поперечной системы разработки (местозаложение, вид, форма и параметры первоначальной выработки под внутренний отвал, вид технологии ведения открытых горных работ);
- оценка влияния процесса интеграции внутреннего отвалообразования в режим действующего карьерного поля.

Интеграция ресурсосберегающих систем разработки в действующее производство посредством расчетной модели [20] позволяет дополнительно обосновать их параметры, показатели и области эффективного применения каждой из поперечных систем разработки. На рис. 4 представлены фрагменты интерфейса компьютерной программы при использовании средств Microsoft Excel с расчетами параметров и показателей формирования поперечных систем разработки в режиме действующего угольного разреза.

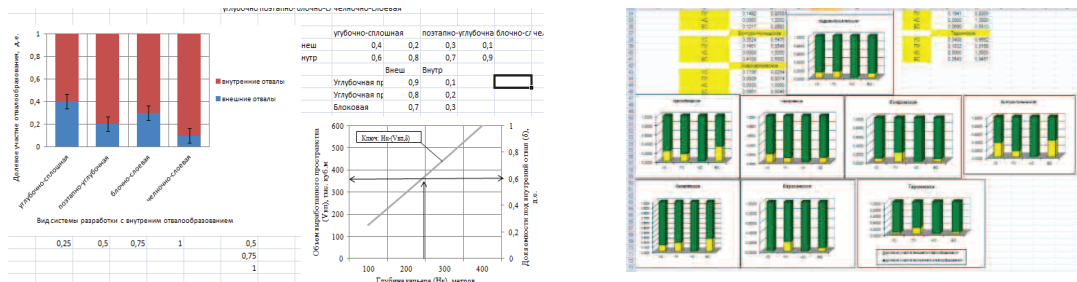
Программа (рис. 4) позволяет давать комплексную оценку адаптации систем разработки с внутренним отвалообразованием для режима действующего разреза: объемные параметры технологий с внутренним отвалообразованием, долевое участие внешнего/внутреннего отвалов, пространственно-временной технологический переход; длительность перехода и доработки карьерного поля; интенсивность горных работ; годовая производственная мощность и др.

Выводы

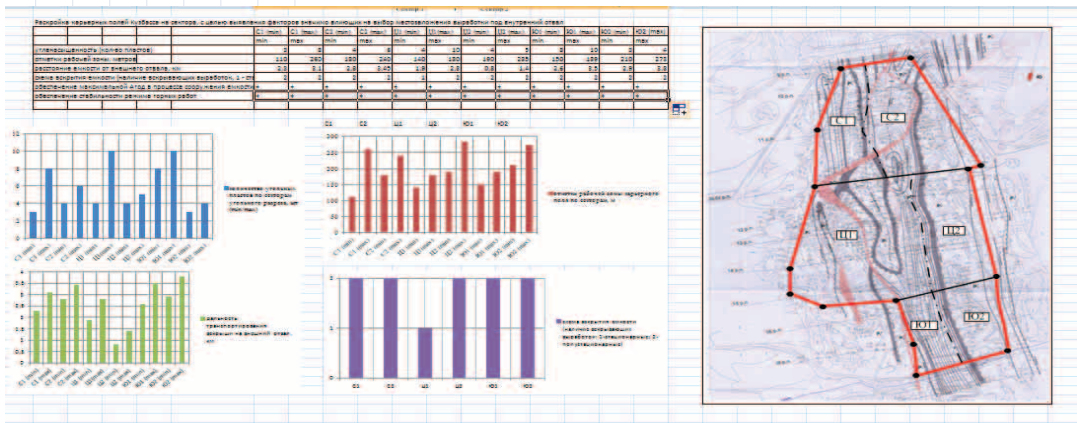
Данные, полученные по результатам оценки численного моделирования процесса адаптации внутреннего отвалообразования к режиму действующих карьерных полей Кемеровской области, позволили получить следующие выводы и рекомендации:

- 1) повышение эффективности угледобычи при отработке крутых и наклонных угольных пластов в рамках традиционных систем разработки ограничивается длительным неиспользованием выработанного карьерного пространства для размещения вскрышных пород;
- 2) основным способом управления развитием горных работ, при котором достигается более раннее использование выработанного пространства для размещения пород вскрыши и дальнейшего непрерывного воспроизводства этого техногенного ресурса, является поэтапное внедрение модернизированных вариантов малоземлемых систем разработки;
- 3) локальное использование систем разработки с внутренним отвалообразованием на некоторых

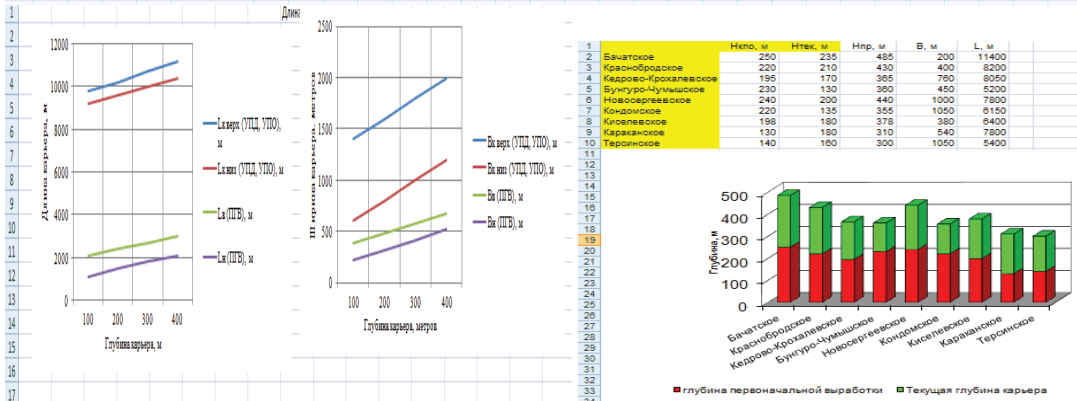
a/a



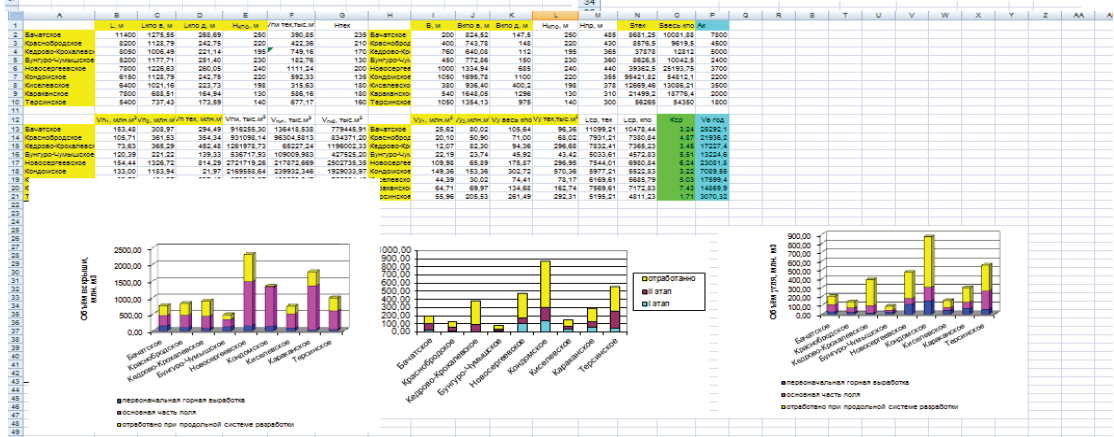
b/b



c/c



d/d



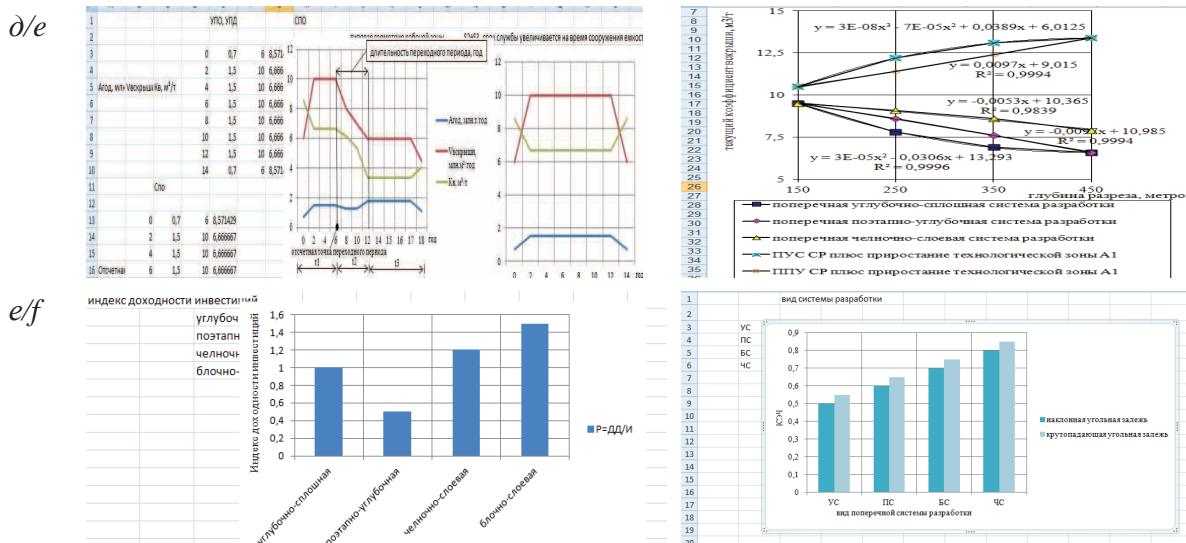


Рис. 4. Фрагменты компьютерной программы при использовании средств Microsoft Excel с расчетами параметров и показателей формирования поперечных систем разработки в режиме действующего угольного разреза: а) пропорции долей внешнего и внутреннего отвалообразования; доля емкости под внутренний отвал в зависимости от глубины карьера и объема выработанного пространства; б) пример раскройки карьерного поля на сектора с целью выявления факторов значимо влияющих на выбор местозаложения выработки под внутренний отвал и процесс перехода от углубочной продольной к поперечным системам разработки; в) геометрические параметры формирования выработок под внутренний отвал по этапам производства горных работ (длина, ширина, глубина); г) объемные параметры по этапам производства горных работ (горная масса, уголь, вскрыша); д) календарный график объемов вскрышных и добычных работ с выделением отсчетной точки и длительности переходного периода, регулирование текущего коэффициента вскрыши; е) чистый дисконтированный доход (NPV), коэффициенты экологической чистоты поперечных систем разработки

Fig. 4. Fragments of a computer program when using Microsoft Excel with calculations of parameters and indicators of formation of cross-development systems in existing coal mine: а) proportions of shares of external and internal dumping; the share of capacity under internal dump depending on the depth of the pit and amount of developed space; б) example of cutting a mining field into sectors to identify the factors which significantly influence the choice of the sector for internal dump and the transition from longitudinal to transverse cross-cut systems of development; в) geometrical parameters of forming excavations under the internal dump according to the stages of production mining (length, width, depth); г) volumetric parameters with regard to the production stages of mining operations (rock mass, coal, and overburden); д) schedule of overburden and mining volumes specifying the reference point and the duration of the transitional period, regulation of the current stripping ratio; е) net present value (NPV), coefficients of the environmental cleanliness of cross-development systems.

- разрезах Кемеровской области подтверждает их высокую эффективность;
- 4) извлекаемые объемы по горной массе при сооружении первоначальных выработок под внутренний отвал (с учетом выработанного пространства) не превышают 5–15 % от общих объемов карьерного поля;
 - 5) длительность перехода от углубочной продольной к разнородным поперечным системам разработки при отработке свит наклонных пластов 3–5 лет, при отработке свит крутопадающих пластов 5–8 лет, с максимальным долевым участием внутреннего отвала;
 - 6) для поддержания работы предприятия с достигнутыми технико-экономическими показателями в период сооружения первоначальной выработки годовая производственная мощ-

- ность поддерживается через показатели интенсификации горных работ, а после перехода на внутрикарьерное отвалообразование может возрасти на 15–20 %;
- 7) к условиям любого действующего угольного разреза можно адаптировать режим внутреннего отвалообразования через процесс технологической трансформации с поддержанием достигнутых технико-экономических показателей производственной деятельности и одновременным снижением землеемкости горного производства. Сформулированные выводы допускают, что предлагаемые технологические решения отработки открытым способом угольных месторождений наклонного и крутого падения могут повысить экономическую эффективность работы действующего разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. 2. Технология и комплексная механизация. – М.: Недра, 1985. – 549 с.
2. Ильин С.А., Коваленко В.С., Пастихин Д.В. Преодоление изначальных недостатков открытого способа разработки: опыт и результаты // Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 25–32.
3. Ильин С.А., Коваленко В.С., Пастихин Д.В. Открытый способ разработки месторождений: возможности и пути совершенствования // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 37–40.
4. Рутковский Б.Т. Блочный способ отработки месторождений открытым способом // Разработка угольных месторождений открытым способом: межвуз. сб. науч. тр. – Кемерово, 1972. – № 1. – С. 81–87.
5. Корякин А.И. Пути создания малоземлеемких технологий открытой угледобычи в Кузбассе // Вестник КузГТУ. – 1991. – № 1. – С. 60–62.
6. Томаков П.И., Коваленко В.С. Природоохранные технологии открытой разработки крутых и наклонных угольных месторождений Кузбасса // Уголь. – 1992. – № 1. – С. 16–20.
7. Саканцев Г.Г., Ческидов В.И. Установление области применения внутреннего отвалообразования при открытой разработке крутопадающих месторождений полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 3. – С. 87–96.
8. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Проблемы и перспективы развития ресурсосберегающих и ресурсоиспользующих геотехнологий комплексного освоения недр земли // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 116–125.
9. Кузнецов В.И. Управление горными работами на открытых разработках полезных ископаемых Кузбасса. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1997. – 164 с.
10. Коваленко В.С. Принципы управления выработанным пространством карьера // Открытые горные работы. – 1999. – № 1. – С. 36–40.
11. Woodruff S. Methods of working coal and metal mines. – N-Y.: Oxf., 1966. – 488 p.
12. Weishi Z., Qingxiang C., Shuzhao C. Optimization of transport passage with dragline system in thick overburden open pit mine // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. – V. 23. – Iss. 6. – P. 901–906.
13. Chadwick J. Open pit or underground // International Mining. – 2012. – № 1. – P. 28–41.
14. Dhananjai V. A finite element approach of stability analysis of internal dump slope in coal field // Mining Journal. – 2014. – № 5. – P. 11–16.
15. Lien L. Advances in coal mining technology // The coal handbook: towards cleaner production. – 2013. – № 1. – P. 193–225.
16. Daemen J. Mining engineering. – Pittsburgh: PA, 2003. – P. 65–96.
17. Селюков А.В. О технологической значимости внутреннего отвалообразования при открытой разработке угольных месторождений Кемеровской области // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 5. – С. 23–34.
18. Селюков А.В. Критерии эколого-экономического сравнения технологий внутреннего отвалообразования // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2015. – № 2. – С. 91–98.
19. Селюков А.В., Литвин Я.О. Технологическое развитие блокового способа открытой разработки угольных месторождений // Естественные и технические науки. – 2015. – № 3 (81). – С. 94–94.
20. Селюков А.В. Имитационное моделирование в среде Excel процесса перехода действующих разрезов Кузбасса на экологосберегающие поперечные системы разработки // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2013. – С. 206–210.

Поступила 16.11.2015 г.

UDC 622.271

EVALUATION OF NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF ADAPTING INTERNAL DUMPING MODE TO THE EXISTING MINING FIELDS OF THE KEMEROVO REGION

Alexey V. Selyukov,

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: alex-sav@rambler.ru

The relevance of the work is due to the development of technical equipment and the scale of open coal mining in the Kemerovo region under condition of agricultural land limitation. Through the use of a special method of mining-geometric analysis of mining field (defining the stages and phases of mining) and technological design of mining systems, technologies of mining queues were developed when you change the direction of heading of mining work. In the first step of this phase of mining is the movement of the bench operations across the strike of the strata to a certain intermediate depth of development primarily with external dumping of overburden, and at the second stage of mining is the movement along the strike of the strata to the final depth of development with predominantly internal dumping. These technologies are called flexible due to a dynamic approach to determining the border between stages and queues for each specific field.

The main aim of the study is modernization of spatial planning decisions on the organization of the technological process for internal dumping of overburden on existing mining fields.

The methods used in the study: combined analysis of design and actual data on the current state of internal dumping in the development of inclined and steeply dipping deposits in the Kemerovo region, special methods of mining-geometric analysis of mining fields in the context of structurally-parametric studies and techno-economic analysis of the proposed solutions using Excel spreadsheet.

Results. The authors proposed rational parameters of internal dumps formation in the conversion process of longitudinal cross system open development into cross development system thereby providing more efficient retrieval to technological and environmental advantages of internal dumping at all the stages due to the additional dumping of one or another intermediate contour of the overburden rocks.

Key words:

Open-pit mining, block diagrams of development, internal dumping, mining field, open-pit coal mines.

REFERENCES

1. Rzhavskiy V.V. *Otkrytye gornye raboty. Ch. 2. Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya* [Open mining. Part 2. Technology and complex mechanization]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 549 p.
2. Ilin S.A., Kovalenko V.S., Pastikhin D.V. Preodolenie iznachalnykh nedostatkov otkrytogo sposoba razrabotki: opyt i rezultaty [Overcoming the original disadvantages of the open-cut method: experience and results]. *Mining magazine*, 2012, no. 4, pp. 25–32.
3. Ilin S.A., Kovalenko V.S., Pastikhin D.V. Otkrytyy sposob razrabotki mestorozhdeniy: vozmozhnosti i puti sovershenstvovaniya [Open method of field development: opportunities and ways of improvement]. *Mining magazine*, 2012, no. 2, pp. 37–40.
4. Rutkovskiy B.T. Blokovyy sposob otrabotki mestorozhdeniy otkrytym sposobom [The block method of mining the deposits by open method]. *Intercollege*, 1972, no. 1, pp. 81–87.
5. Koryakin A.I. Puti sozdaniya malozemleemkikh tekhnologiy otkrytoy ugledobychi v Kuzbasse [Towards the creation of small capacity of the earth technologies of open coal production in Kuzbass]. *Vestnik KuzSTU*, 1991, no. 1, pp. 60–62.
6. Tomakov P.I., Kovalenko V.S. Prirodookhrannye tekhnologii otkrytoy razrabotki krutykh i naklonnykh ugolnykh mestorozhdeniy Kuzbassa [Environmental protection technologies of open development of steep and inclined coal deposits of the Kuznetsk basin]. *Coal*, 1992, no. 1, pp. 16–20.
7. Sakantsev G.G., Cheskidov V.I. Ustanovlenie oblasti primeneniya vnutrennego otvaloobrazovaniya pri otkrytoy razrabotke krutopadayushchikh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Determining the scope of internal dumping in opencast mining of steeply dipping deposits of minerals]. *Journal of Mining Science*, 2014, no. 3, pp. 87–96.
8. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Problemy i perspektivy razvitiya resursosbergayushchikh i resursovosproizvodyashchikh geotekhnologiy kompleksnogo osvoeniya neдр zemi [Problems and prospects of development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies of complex development of bowels of the earth]. *Journal of Mining Science*, 2012, no. 4, pp. 116–125.
9. Kuznetsov V.I. *Upravlenie gornymi robotami na otkrytykh razrabotkakh poleznykh iskopaemykh Kuzbassa* [Management of mining operations in open pit mining of the Kuznetsk basin]. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat, 1997. 164 p.
10. Kovalenko V.S. Printsipy upravleniya vyrabotannym prostranstvom karera [Principles of management of mined-out space]. *Open-pit mining*, 1999, no. 1, pp. 36–40.
11. Woodruff S. *Methods of working coal and metal mines*. N-Y., Oxf., 1966. 488 p.
12. Weishi Z., Qingxiang C., Shuzhao C. Optimization of transport passage with dragline system in thick overburden open pit mine overburden open pit mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23, iss. 6, pp. 901–906.
13. Chadwick J. Open pit or underground. *International Mining*, 2012, no.1, pp. 28–41.
14. Dhananjai V. A finite element approach of stability analysis of internal dump slope in coal field. *Mining Journal*, 2014, no. 5, pp. 11–16.
15. Lien L. Advances in coal mining technology. *The coal handbook: towards cleaner production*, 2013, no. 1, pp. 193–225.
16. Daemen J. *Mining engineering*. Pittsburgh, PA, 2003. pp. 65–96.
17. Selyukov A.V. O tekhnologicheskoy znachimosti vnutrennego otvaloobrazovaniya pri otkrytoy razrabotke ugolnykh mestorozhdeniy Kemerovskoy oblasti [About the technological significance of internal dumping in opencast mining of coal deposits in Kemerovo region]. *Journal of Mining Science*, 2015, no. 5, pp. 23–34.
18. Selyukov A.V. Kriterii ekologo-ekonomicheskogo sravneniya tekhnologiy vnutrennego otvaloobrazovaniya [Criteria of ecological-economic comparison of technologies for internal dumping of high technologies of development and exploitation of mineral resources]. *High technologies of development and use of mineral resources*, 2015, no. 2, pp. 91–98.
19. Selyukov A.V., Litvin Ya.O. Tekhnologicheskoe razvitie blokovogo sposoba otkrytoy razrabotki ugolnykh mestorozhdeniy [Technological development of block-method of opencast mining of coal deposits]. *Natural and technical sciences*, 2015, no. 3 (81), pp. 94–94.
20. Selyukov A.V. Imitatsionnoe modelirovanie v srede Exsel protsessа perekhoda deystvuyushchikh razrezov Kuzbassa na ekologosbergayushchie poperechnye sistemy razrabotki [Imitating modeling in the environment of «Excel» of the transition of existing mines in Kuzbass region on ecological cross-development system]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bezopasnost zhiznedeyatelnosti predpriyatii v promyshlennno razvitykh regionakh* [Materials X Int. scient. conf. Life safety companies in the industrialized regions]. Kemerovo, 2013. pp. 206–210.

Received: 16 November 2015.

УДК 621.3:001.893

ОБНАРУЖЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Стругов Вячеслав Владимирович,

аспирант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: sv_altai@sibmail.com

Лавринович Валерий Александрович,

доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: lavrhome@mail.ru

При добыче, транспортировке и переработке георесурсов используется различное электротехническое оборудование, неотъемлемой частью которого являются машины постоянного тока. Энергоэффективность и надежность производства зависит от состояния электроприводов. Выход одного двигателя может привести к остановке производственного процесса и, как следствие, повлечь за собой убытки. Одной из причин выхода из строя электродвигателей постоянного тока является повреждение изоляции из-за воздействия на нее частичных разрядов, методики обнаружения которых в двигателях постоянного тока к настоящему времени не разработано. Для своевременного предупреждения выхода из строя машин постоянного тока и снижения затрат на unplanned остановки, по замене вышедшего из строя электродвигателя, предлагается выявлять частичные разряды на ранней стадии. В области частичных разрядов проведено множество исследований, связанных с их обнаружением. Основная часть методов относится к оборудованию, работающему на переменном напряжении. Для оборудования, работающего на постоянном напряжении, надежных методов обнаружения частичных разрядов пока не разработано. Поэтому в настоящее время вопрос по диагностированию частичных разрядов в машинах постоянного тока является достаточно актуальным.

Цель работы. Создание метода для обнаружения частичных разрядов при помощи подаваемого импульсного напряжения постоянного тока на испытуемый объект.

Методы исследования. Создана физическая модель для обнаружения частичных разрядов. При помощи полученной модели и электронного осциллографа Tektronix типа TDC-2012 осуществлялась регистрация частичных разрядов для дальнейшей обработки и анализа на компьютере.

Результаты. Разработан метод по обнаружению частичных разрядов постоянным напряжением путем подачи одного короткого импульса. На созданной физической модели проведен ряд испытаний, позволивших выявить ряд неких закономерностей, на основании которых можно судить о наличии или отсутствии частичных разрядов в испытуемом объекте. По результатам работы был получен патент.

Ключевые слова:

Частичный разряд, импульсный метод, обнаружение, дефект, науглероживание, ресурсоэффективность.

Введение

Для энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе георесурсов важную роль играет состояние электротехнического оборудования. Выход из строя одного электродвигателя может привести как к экономическим затратам, так и к затратам ресурсов. Практически в любом высоковольтном оборудовании в рабочих режимах существуют частичные разряды, однако их разрушающая способность может быть различна. Наличие дефектов в изоляции на основе полимерных материалов может приводить к возникновению частичных разрядов. Существенными факторами, определяющими эрозию диэлектрика под действием частичных разрядов, являются бомбардировка их поверхности заряженными частицами из плазмы газового разряда, химическое взаимодействие с продуктами, образующимися в разряде, а также ультрафиолетовое облучение. Роль отдельных факторов действия разряда для разных полимеров может быть различной [1].

В современных условиях, когда более 50 % силового электрооборудования объектов в российской

энергетики и большинства промышленных предприятий достигло нормативного срока эксплуатации, а его обновление происходит низкими темпами, основной задачей становится продление срока службы оборудования вплоть до выработки реального, заложенного при изготовлении, ресурса [2]. Обеспечение продолжительного срока службы электрической изоляции и, как следствие, рационального использования георесурсов является важной научной и практической задачей.

Ряд авторов [3, 4] в своих трудах доказал, что разрушение изоляции происходит под действием ионизации в газовых включениях. Исходя из практики, полный пробой изоляции электрической машины возникает не сразу, ему предшествуют частичные разряды, перекрывающие часть изоляционного промежутка [5, 6]. Частичные разряды сопровождаются короткими импульсами тока и напряжения, параметры которых зависят от типа изоляции, степени ее старения, рабочего напряжения, нагрузки, температуры и др. [7, 8]. Они могут регистрироваться датчиками емкостного типа, со-

единенными с высоковольтной шиной через конденсатор связи (или его эквивалент), электромагнитными датчиками, использующими внешние антенны специальной конструкции, и акустическими датчиками, регистрирующими звуковые эффекты от частичных разрядов [9–12].

Время от возникновения первичных частичных разрядов до полного пробоя изоляции в большинстве случаев составляет от нескольких недель до нескольких лет. Поэтому параметры частичных разрядов, в особенности динамика их развития, являются важными диагностическими признаками для оценки состояния изоляции. Их фиксация дает возможность обнаруживать дефекты на ранней стадии развития, планировать и осуществлять оптимальные ремонтные работы.

Начиная с начала XX в. и по настоящее время вопрос об изучении частичных разрядов остается достаточно актуальным. Диагностике частичных разрядов в трансформаторах и машинах переменного тока оказано большое внимание множеством авторов [2, 5–16]. Обнаружению частичных разрядов в изоляции машин постоянного тока до настоящего времени не уделялось должного внимания в связи с отсутствием достоверной методики обнаружения частичных разрядов на постоянном напряжении. В связи с наличием огромного парка машин постоянного тока, например на объектах железной дороги, стоит острая проблема их обнаружения в оборудовании с большим сроком эксплуатации.

Физическая модель

На ранее запатентованном устройстве обнаружения частичных разрядов, представленном на рис. 1, приводится блочная схема модели [17].

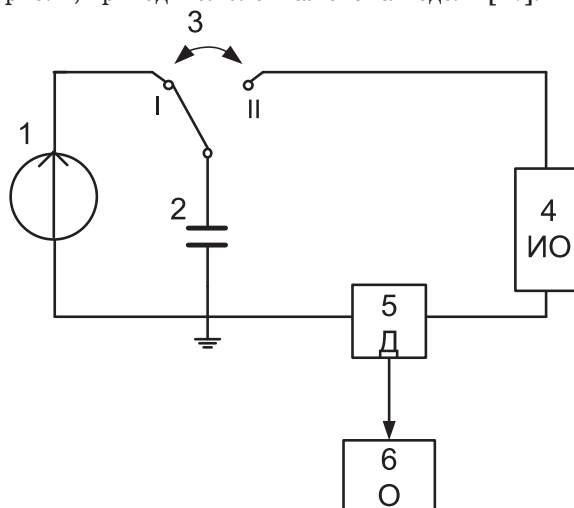


Рис. 1. Блочная схема модели: 1 – высоковольтный источник постоянного тока; 2 – высоковольтный конденсатор; 3 – коммутационный ключ; 4 – испытуемый объект; 5 – датчик; 6 – осциллограф Tektronix типа TDC-2012 с полосой 100 МГц

Fig. 1. Block diagram of the model: 1 – high-voltage DC power source; 2 – high-voltage capacitor; 3 – switching key; 4 – test object; 5 – sensor; 6 – Tektronix oscilloscope type TDC-2012 with 100 MHz bandwidth

Принцип работы модели: высоковольтным источником постоянного тока, через первое положение коммутационного ключа, заряжаем высоковольтный конденсатор. Далее переключаем коммутационный ключ во второе положение, тем самым подавая на испытуемый объект импульсное напряжение постоянного тока [17].

В ходе экспериментов, для подтверждения гипотезы, в качестве испытуемых объектов применялись разные материалы. Первым было органическое стекло с искусственным дефектом. Так как диаметр дефекта составлял 2 мм, максимальное напряжение, подаваемое на испытуемый объект, составило 11 кВ. В качестве датчика использовано мало индуктивное сопротивление номиналом 1 Ом. Осциллограф подключался к датчику через высоковольтный делитель напряжения марки РРЕ6KV с характеристиками: коэффициент деления 1000:1, 400 MHz, 5 MOhms/50 MOhms.

На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы при различном импульсном напряжении. При сравнении осциллограмм видно, что при увеличении уровня подаваемого напряжения с конденсатора пропадают пиковые всплески и амплитуда напряжения уменьшается с десятков вольт до единиц. Это связано с тем, что частичный разряд расходует часть энергии, тем самым поглощая всплески.

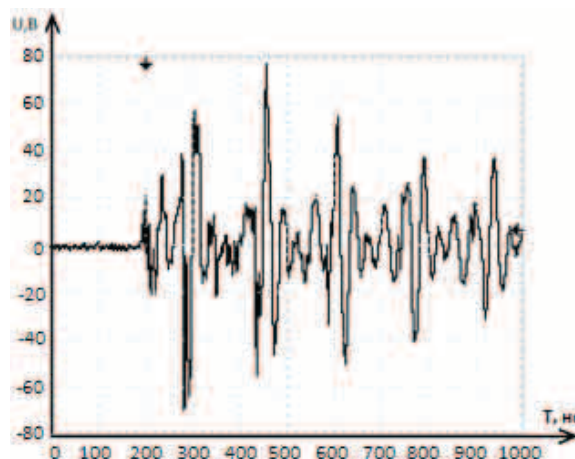


Рис. 2. Переходная характеристика при 6 кВ

Fig. 2. Transient response at 6 kV

После ряда повторений эксперимента на напряжении в 9 кВ и увеличения напряжения наблюдается увеличение амплитуды на осциллограмме (рис. 4). В дальнейшем, при проведении эксперимента на напряжении 9 кВ, характеристика не повторялась (рис. 3). Это связано с тем, что после появления частичных разрядов в искусственном дефекте на его поверхности появилось науглероживание. Условно дефект представляется емкостью, и науглероживание является шунтом. При сравнении характеристик на рис. 3–5 можно сделать вывод, что после появления частичных разрядов появилось науглероживание, которое частично зашунтировало дефект, поэтому на рис. 4 колебание немного больше, чем на рис. 3.

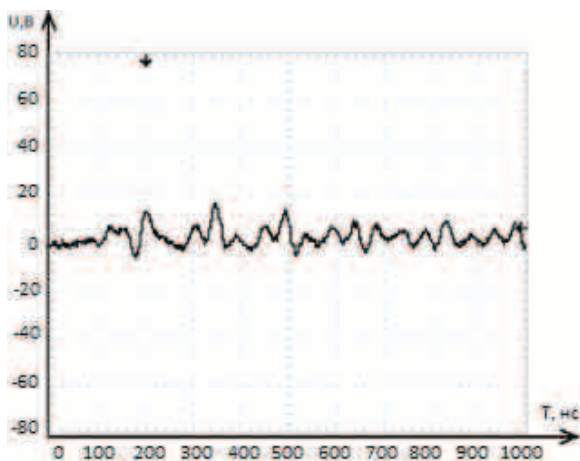


Рис. 3. Переходная характеристика при 9 кВ

Fig. 3. Transient response at 9 kV

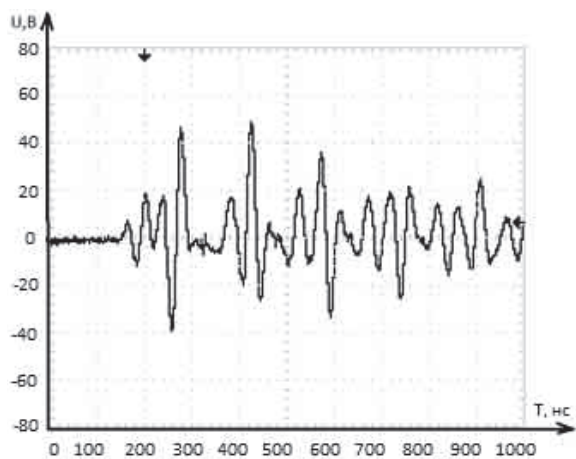


Рис. 4. Переходная характеристика при 11 кВ

Fig. 4. Transient response at 11 kV

На рис. 5 и 6 приведены фотографии дефектов до и после экспериментов соответственно. До экспериментов наглядно видно, что дефект прозрачный, а после эксперимента появилось науглероживание, что привело к помутнению дефекта [18].



Рис. 5. Искусственный дефект до эксперимента

Fig. 5. Artificial defect before the experiment



Рис. 6. Искусственный дефект после эксперимента

Fig. 6. Artificial defect after the experiment

Такой же эффект был получен при опытах с непропитанным конденсатором малой емкости (рис. 7, 8). В качестве испытуемого объекта выступали бумага и полипропиленовая пленка, являющаяся изоляцией между откладок конденсатора. С увеличением подаваемого напряжения низкочастотная амплитуда возрастала, с появлением частичных разрядов высокочастотная составляющая исчезала. В данном опыте в качестве датчика применялся малоиндуктивный шунт с сопротивлением $11,104 \cdot 10^{-3}$ Ом, с которого передавались данные на осциллограф.

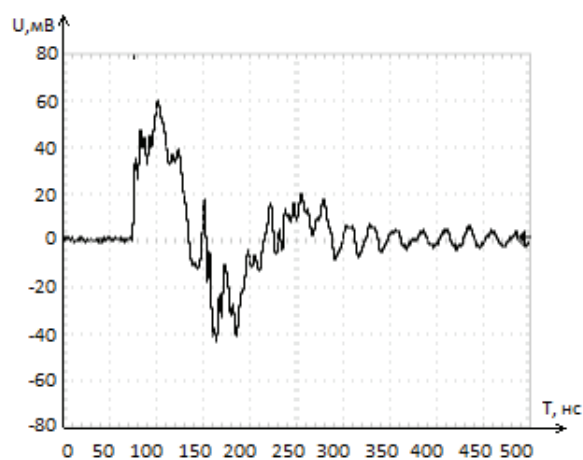


Рис. 7. Переходная характеристика при 200 В

Fig. 7. Transient response at 200 V

Иную картину можно наблюдать при испытании конденсатора с емкостью 0,12 мкФ. В качестве испытуемого объекта также выступали бумага и полипропиленовая пленка, являющаяся изоляцией между откладок конденсатора. На рис. 9 приведена характеристика сухого конденсатора с проявляющимися на ней частичными разрядами в виде высокочастотных колебаний на второй половине, тогда как в пропитанном конденсаторе, при том же уровне напряжения, высокочастотных колебаний нет (рис. 10). В качестве датчика также применялся малоиндуктивный шунт с сопротив-

лением $11,104 \cdot 10^{-3}$ Ом, с которого передавались данные на осциллограф.

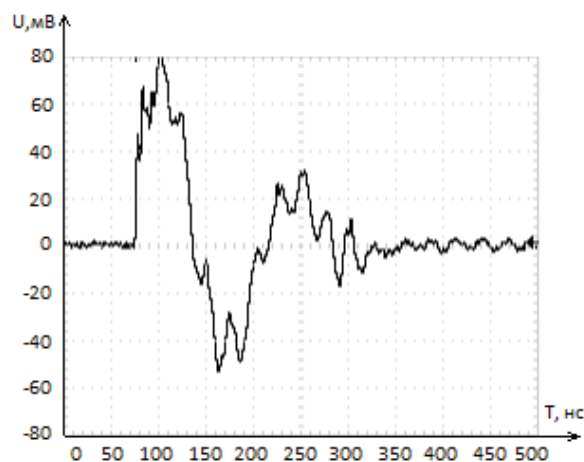


Рис. 8. Переходная характеристика при 280 В

Fig. 8. Transient response at 280 V

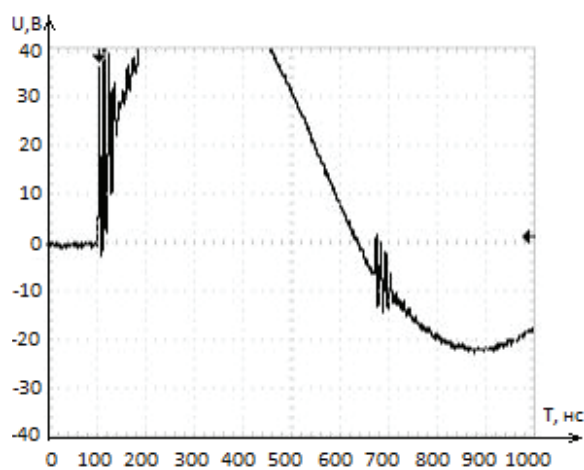


Рис. 9. Переходная характеристика при 300 В на непропитанном конденсаторе

Fig. 9. Transient response at 300 V to unimpregnated capacitor

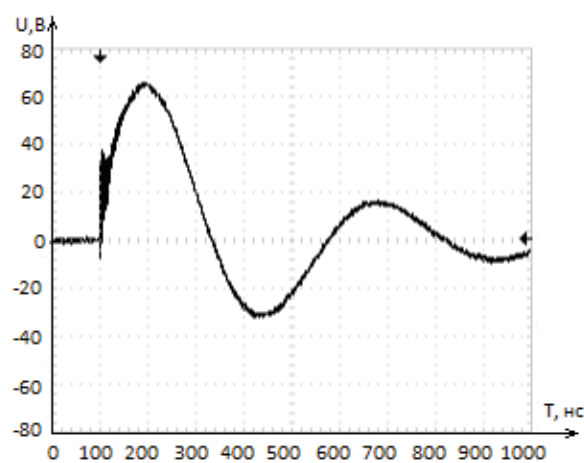


Рис. 10. Переходная характеристика при 300 В на пропитанном конденсаторе

Fig. 10. Transient response at 300 V to impregnated capacitor

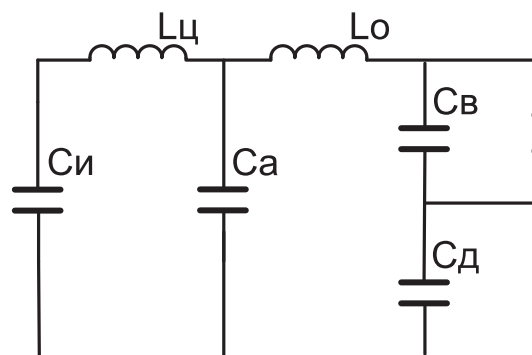


Рис. 11. Эквивалентная схема при рассмотрении частичных разрядов в диэлектрике: $C_{и}$ – емкость источника; $C_{в}$ – емкость элемента диэлектрика, участвующего в частичных разрядах (емкость включения); $C_{д}$ – емкость элемента диэлектрика, включенного последовательно с первым; $C_{з}$ – емкость остальной части диэлектрика, лишенной включений; $L_{ц}$ – индуктивность цепи; $L_{о}$ – индуктивность испытуемого объекта [19, 20]

Fig. 11. Equivalent circuit when considering partial discharges in the dielectric: $C_{и}$ – capacity of the source; $C_{в}$ – capacity of the dielectric element involved in partial discharges (switching capacity); $C_{д}$ – capacity of the dielectric element connected in series with the first; $C_{з}$ – capacity of the rest of the insulator devoid of inclusions; $L_{ц}$ – circuit inductance; $L_{о}$ – inductance of the test object [19, 20]

Данная разница в форме кривых и проявление частичных разрядов объясняется емкостью испытуемого объекта. На рис. 11 представлена эквивалентная схема частичных разрядов в диэлектрике. При относительно малой емкости испытуемого объекта в момент появления частичного разряда $C_{в}$ как бы закорачивается, забирая энергию на себя, тем самым снижая высокочастотную составляющую. Тогда как при значениях $C_{з}$, значительно больших значений $C_{в}$, появление частичных разрядов, закорачивающих $C_{в}$, приводит к образованию высокочастотных колебаний.

Заключение

По созданной физической модели и разработанному методу были получены результаты на нескольких испытуемых материалах. Экспериментально установлено и на модели проверено, что параметры объекта, особенно такие как емкость объекта и индуктивность присоединительных проводников, значительно влияют на форму импульса отклика. Форма импульса-отклика при появлении частичных разрядов значительно отличается от формы импульса-отклика при их отсутствии. Это позволяет утверждать, что импульсный метод является достаточно чувствительным и с его помощью можно экспериментально обнаруживать единичные частичные разряды в твердых диэлектриках электрических машин постоянного тока. Доработка этого метода может привести к созданию новой методики обнаружения частичных разрядов импульсным методом в машинах постоянного тока и переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галичин Н.А., Борисова М.Э. Влияние частичных разрядов на спектры токов термостимулированной деполяризации // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. Физика. – 2009. – № 79. – С. 119–128.
2. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 338 с.
3. Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges // Journal of the Institution of Electrical Engineers. – 1953. – V. 98. – P. 49–51.
4. Беркс Дж.Б., Шульман Дж.Г. Прогресс в области диэлектриков. Т. 1. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 308 с.
5. Голенко О.В., Живодерников С.В., Овсянников А.Г. Регистрация частичных разрядов в изоляции маслонаполненного оборудования // Повышение эффективности работы энергосистем: труды ИГЭУ. – 2001. – Вып. 4. – С. 303–309.
6. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
7. Аксенов Ю.П., Завидей В.И., Ярошенко И.В. Использование усовершенствованных методов электромагнитной локации разрядных явлений для определения объема ремонта трансформаторов // Электро. – 2004. – № 5. – С. 19–24.
8. Акустическая локация электрических разрядов в измерительных трансформаторах / А.П. Долин, С.К. Цветаев, Ч. Поночко, А. Поночко // Электро. – 2005. – № 2. – С. 27–31.
9. Ботяев Ю.В., Михеев А.Г., Храмов А.Н. Диагностика высоковольтного оборудования подстанции // Повышение эффективности работы энергосистем: труды ИГЭУ. – 2001. – Вып. 4. – С. 291–294.
10. Виноградова Л.В. Экспертная поддержка процессов проектирования и диагностики силовых трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: ИГЭУ, 1996. – 18 с.
11. Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 1998. – V. 4. – P. 15–20.
12. Овсянников А.Г. Стратегия ТОиР и диагностика оборудования // Новости электротехники. – 2008. – № 2. – С. 140–142.
13. Lavrinovich V.A. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low-voltage impulse // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 2014. – V. 2. – P. 382–385.
14. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». – 2012. – V. 4. – P. 149–153.
15. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». – 2014. – V. 6. – P. 145–147.
16. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 2015. – V. 22. – P. 2041–2045.
17. Устройство для обнаружения частичных разрядов: пат. Рос. Федерация № 2014106561/07; заявл. 20.02.2014; опубл. 17.03.2015, Бюл. № 16. – 6 с.
18. Стругов В.В., Лавринович В.А., Антипов С.А. Импульсный метод обнаружения частичных разрядов // Современные техника и технологии: труды XX Международной научно-практической конференции. – 2014. – Т. 1. – С. 49–50.
19. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.
20. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 41 с.

Поступила 23.11.2015 г.

UDC 621.3:001.893

DETECTION OF PARTIAL DISCHARGE IN DC MOTORS BY PULSE METHOD

Vyacheslav V. Strugov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: sv_altai@sibmail.com

Valeriy A. Lavrinovich,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lavrhome@mail.ru

In the production, transportation and processing of biological resources different electrical equipment is used, the integral part of which are DC machines. Energy efficiency and reliability of the production depends on the drives. The breakdown even of one engine may stop the production process and consequently entail losses. One reason for the failure of the DC motors is insulation damage due to exposure to partial discharge, however, a partial discharge detection technique has not been developed yet. For early warning of failure of DC machines and reducing the cost of unplanned stoppage on the replacement of a failed motor it is proposed to detect partial discharges at an early stage. There are many developments related to the detection of partial discharges. The majority of methods refer to equipment operating with AC voltage. For equipment operating at a constant voltage, reliable methods for partial discharge detection are not developed yet. Therefore, now the question of the diagnosis of partial discharge in the DC machine is quite relevant.

Objective: to provide a method for detecting the partial discharge pulse applied using the DC voltage to the test object.

Methods. A physical model for the detection of partial discharges was created. With the resulting model and electronic Tektronix oscilloscope type TDC-2012 the registration of partial discharge was carried out, for further processing and analysis on a computer.

Results. The authors developed a method for the detection of partial discharge constant voltage by applying a short pulse. A series of tests, which revealed a number of certain laws by which we can judge the presence or absence of partial discharge in the test object, were performed by means of the created physical model. The authors obtained a patent on the basis of this research.

Key words:

Partial discharge, pulse method, detection of, defect, carburizing, resource efficiency.

REFERENCES

- Galichin N.A., Borisova M.E. Vliyaniye chastichnykh razryadov na spektry tokov termostimulirovannoy depolyarizatsii [Effect of partial discharge in the spectra of thermally stimulated depolarization currents]. *Bulletin of the RSPU named after Herzen. Physics*, 2009, no. 79, pp. 119–128.
- Aksenov Yu.P. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovoltnoy izolyatsii elektrooborudovaniya energeticheskogo naznacheniya v ekspluatatsii i pri remontakh* [Monitoring of the technical condition of high voltage insulation of electrical energy destination in operation and repairs]. Moscow, Nauchtekhizdat Publ., 2002. 338 p.
- Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges // *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1953, vol. 98, pp. 49–51.
- Berx J.B., Shulman J.G. Progress v oblasti dielektrikov [Progress in the field of dielectrics]. *State Energy Publishing*, 1962, vol. 1, pp. 118–166.
- Golenko O.V., Zhivodernikov S.V., Ovsyannikov A.G. Registratsiya chastichnykh razryadov v izolyatsii maslonapolnennogo oborudovaniya [Registration of partial discharges in insulation of oil-filled equipment]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [Proc. of the ISPU. Improving the efficiency of energy systems]. Ivanovo, 2001, iss. 4. pp. 303–309.
- Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya* [Methods and tools for the diagnosis of high voltage equipment]. Moscow, Energoatomizdat, 1992. 240 p.
- Aksenov Yu.P., Zavidey V.I., Yaroshenko I.V. Ispolzovanie usovershenstvovannykh metodov elektromagnitnoy lokatsii razryadnykh yavleniy dlya opredeleniya obema remonta transformatorov [Use of improved methods for electromagnetic phenomena bit locations to determine the amount of repair transformers]. *Elektro*, 2004, no. 5, pp. 19–24.
- Dolin A.P., Tsvetaev S.K., Ponocho Ch., Ponocho A. Akusticheskaya lokatsiya elektricheskikh razryadov v izmeritelnykh transformatorakh [Acoustic location of electrical discharges in instrument transformers]. *Elektro*, 2005, no. 2, pp. 27–31.
- Botyayev Yu.V., Mikheev A.G., Khramtsov A.N. Diagnostika vysokovoltnogo oborudovaniya podstantsii [Diagnosis of high-voltage substation]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [Proc. of the ISPU. Improving the efficiency of energy systems]. Ivanovo, 2001, iss. 4. pp. 291–294.
- Vinogradova L.V. *Ekspertnaya podderzhka protsessov proektirovaniya i diagnostiki silovykh transformatorov*. Avtoref. Dis. Cand. nauk [Expert support of the design and diagnostics of power transformers. Author's abstract Dis. Cand.]. Ivanovo, 1996. 18 p.
- Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 1998, vol. 4, pp. 15–20.
- Ovsyannikov A.G. Strategii TOiR i diagnostika oborudovaniya [Strategy MRO and diagnostics equipment]. *Novosti elektrotekhniki*, 2008, no. 2, pp. 140–142.
- Lavrinovich V.A. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low-voltage impulse. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2014, vol. 2, pp. 382–385.
- Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method. *Technical and Physical Problems of Engineering*, 2012, vol. 4, pp. 149–153.
- Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses. *Technical and Physical Problems of Engineering*, 2014, vol. 6, pp. 145–147.
- Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2015, vol. 22, pp. 2041–2045.
- Lavrinovich V.A., Strugov V.V. *Ustroystvo dlya obnaruzheniya chastichnykh razryadov* [An apparatus for partial discharge detection]. Patent RF, no. 2553281, 2015.
- Strugov V.V., Lavrinovich V.A., Antipov S.A. Impulsnyy metod obnaruzheniya chastichnykh razryadov [Pulse detection method of partial discharge]. *Trudy XX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye tekhnika i tekhnologii»* [Proc. 20th Int. scien.-prac. conf. Modern equipment and technology]. Tomsk, 2014, vol. 1. pp. 49–50.
- Kuchinskiy G.S. *Chastichnye razryady v vysokovoltnykh konstruktivnykh* [Partial discharges in high-voltage designs]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 224 p.
- Vdoviko V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovoltnogo oborudovaniya* [Partial discharges in the diagnosis of high-voltage equipment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 41 p.

Received: 23 November 2015.

УДК 551.501

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К КЛАСТЕРИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Ботыгин Игорь Александрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: bia@tpu.ru

Катаев Сергей Григорьевич,

доктор технических наук, профессор кафедры общей физики физико-математического факультета Томского государственного педагогического университета, Россия, 634061, г. Томск, ул. Киевская, 60. E-mail: sgkataev@sibmail.com

Тартаковский Валерий Абрамович,

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. E-mail: trtk@list.ru

Шерстнёва Анна Игоревна,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: sherstneva@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки универсальных информационно-аналитических подходов для извлечения знаний из бурно растущего объема геофизических данных. Одна из основных задач в обработке геофизических данных заключается в выявлении в них объективно существующих закономерностей, на которых можно построить разнообразные, в том числе и прогнозные, модели поведения выделенных параметров геофизических полей. И именно технологии кластеризации данных являются начальным базисом для создания программного обеспечения подобных информационных систем анализа неструктурированных данных.

Цель работы. Разработка методики кластеризации экспериментальных данных геофизической природы на основе выделения структур для решения задач анализа неструктурированной информации при изучении и контроле состояний сложных систем.

Методы исследования. Классические и современные методы и алгоритмы кластеризации, алгоритмы теории графов, контрольный пример кластеризации геофизического поля метеорологических параметров с территории северной части Евразии.

Результаты. Разработан новый алгоритм выделения структур в исходном геофизическом поле, позволяющий по пространственным характеристикам декомпозировать исследуемое пространство на области с похожим поведением исследуемых параметров. Алгоритм основывается на структуризации различных разложений (сезон, аномалия и т. д.) геофизических полей и обеспечивает получение разнообразной информации об исследуемом объекте в виде наборов параметров выделенных структур. Подобная информация вместе с сопутствующими эмпирическими зависимостями между параметрами рассматривается как обобщенная экспериментальная характеристика исследуемого объекта и служит основой для формирования гипотез и моделей его поведения. Кроме того, построенная таким образом структурная модель пространства метеорологического параметра обеспечивает возможность сжатия первичной информации без существенной потери семантической значимости исследуемого геофизического поля.

Ключевые слова:

Геофизическое поле, кластеризация, теория графов, структура, метод выделения структур, метеонаблюдения, временной ряд.

Введение

Решение задач развития цивилизации однозначно предполагает наличие пространственно-временных систематических наблюдений за изменениями природных и антропогенно-техногенных систем. Получаемые таким образом данные, в соответствии с определением из [1], интерпретируются как геофизические поля (ГП), или, другими словами, как «множество значений физических величин (параметров), характеризующих есте-

ственное или искусственно созданное в Земле физическое поле (или его отдельные элементы) в пределах определенной территории или области Земли». Интерес к изучению геофизических полей как природного, так и техногенного происхождения, связан, прежде всего, с необходимостью оценки их влияния на изменение окружающей среды и геоэкологической обстановки, так как именно физические поля коренным образом влияют на энергетический обмен между живой и неживой приро-

дой и, следовательно, на качество жизни не только отдельных экологических систем, но и всей биосферы. Интерес к изучению геофизических полей связан и с изменением климата, однозначно влияющим на экологическую обстановку на планете.

Анализ структуры климатических полей (климатическое районирование, выделение классов и т. п.), с одной стороны, направлен на анализ закономерностей формирования различных типов климата в глобальной климатической системе. С другой стороны, определение территориальных границ типов климата, различных по своим свойствам, позволяет преобразовать огромное количество информации о климатических параметрах в гораздо меньшее число информационных структур с целью использования полученных результатов в хозяйственно-экономических мероприятиях и при моделировании климатических ситуаций. Таким образом, научная и практическая значимость любой климатической структуризации бесспорна. Чем больший региональный уклон имеют подобные исследования, тем более высокую социально-экономическую эффективность может нести полученная информация для конкретных отраслей. Если задача решается для исследования генезиса климата местности, основываясь на всем комплексе климатических условий соответствующих ландшафтных зон, то говорят о климатической классификации. Если выделение структур в полях элементов климата проводят для прикладных целей, то данную процедуру называют климатическим районированием.

Широко известным классическим классификациям климата присуща значительная доля субъективизма. При выделении климатических типов, зон, районов, помимо непосредственно температурно-влажностных характеристик, учитывается преобладание над территорией соответствующих типов воздушных масс по сезонам года и особенности их циркуляции, степень континентальности климата, характер подстилающей поверхности. Так, классы в одной из наиболее используемой в мире классификации климата В.П. Кеппена [2] выделяются на основе количественных критериев тепло-влажностного режима с учетом ландшафтных особенностей территории. Классификация климата Л.С. Берга [3] основана на учете ландшафтно-географических зон суши. Границы климатических зон в генетической классификации Б.П. Алисова [3] определяются по среднему положению климатических фронтов, то есть в основе этой классификации лежит учет условий формирования климата в зависимости от типов воздушных масс и их циркуляции. На основе градаций характеристик тепло- и влагообеспеченности приземного воздуха и учета параметров теплового баланса деятельной поверхности построена классификация климатических режимов в работе [4]. Современные классификации предлагают более формализованные подходы, основанные, например, на учете вклада каждого влияющего фактора, но ранжированного своим весовым коэффициентом [5].

В работах, посвященных нахождению закономерностей поведения во времени полей метеопараметров (временных рядов, заданных в определенных пространственных точках) или иных характеристик на территориях разного масштаба, обычно исследуется поведение тренда в выбранном ареале, поскольку именно тенденция изменения временного ряда дает возможность осуществлять прогнозирование. В этих задачах широко применяются все методы анализа многомерных геофизических данных, направленные на поиск в этих данных тех или иных регулярностей, проявляющихся в существовании явных или неявных структур. К классическим методам многомерной статистики обычно относят: метод главных компонент, факторный и корреляционный анализ, дискриминантный и кластерный анализ, многомерное шкалирование [6–13]. Выбор сочетания методов исследования зависит от целей исследования, природы данных и наличия априорной информации о возможных связях.

В ряде работ дополнительно исследуется структура временного ряда, под которой понимаются его характерные особенности, сформулированные в сжатом виде. Так, в работах [14–17] при исследовании периодических рядов среднемесячных температур (общего содержания озона, осадков и др.) в качестве параметров, оценивающих характерные особенности, использовались и среднее значение, и дисперсия, и фаза, и параметры тренда, и др. Используя этот набор данных, можно с той точностью, которую допускают данные, описать временной ряд и дать статистический прогноз его поведения.

Пространственно-временные связи между различными полями метеопараметров обычно изучают с использованием корреляционного анализа, который позволяет определить и временные показатели запаздывания или опережения событий и явлений. Канонический корреляционный анализ в линейной и нелинейной формах широко используется в климатологии, в частности для сезонного прогноза [18], анализа структуры колебаний Эль-Ниньо [19], определения среднеширотного атмосферного отклика на вариации приповерхностной температуры Тихого океана [19, 20].

При решении задачи прогнозирования климата также используются разнообразные подходы, основанные на применении классических методов регрессионного анализа [21–27], главных компонент (эмпирических ортогональных функций) [28–35].

Среди методов многомерной статистики именно кластеризация чаще всего применяется для обработки данных во многих природно-климатических исследованиях. Заметим, что результат применения кластерного анализа – набор пространственных областей (кластеров), обладающих похожим поведением изучаемого параметра или целого набора параметров. Например, в [36] для систематизации полей гидротермического коэффициента Селянинова были использованы алгоритмы иерар-

хического кластерного анализа. Итогом явилось сжатие рассматриваемых массивов данных. Иерархическая кластеризация использовалась также при решении задачи прогноза облачности в [37]. Эксперименты проводились с разным числом кластеров и разными признаками. В работе [38] иерархическая кластеризация использовалась для решения задачи климатического районирования. Исходные данные были взяты для 35 метеостанций по 22 климатическим показателям. В исследованиях по дистанционному зондированию Земли [39] также был успешно использован иерархический (дивизимный) алгоритм кластеризации.

Кластеризация по методу k -средних была применена для решения задачи пространственной декомпозиции метеорологических полей Северного полушария [40]. Для исследования были использованы глобальные агроклиматические данные из базы FAOCLIM-2, где для каждой из почти 32000 метеостанций мира указаны до 14-ти наблюдаемых и вычисляемых параметров за длительные периоды наблюдений. Используемые для кластеризации итоговые данные составили порядка 100000 значений годовых осадков и около 5000 среднегодовых температур. В [41] для исследования была использована разновидность метода k -средних – метод динамических ядер. С его помощью были выделены 4 кластера – географо-климатических варианта светлых травяных лесов (подтайги). Алгоритм кластеризации, известный как Shared Nearest Neighbor (SNN), был использован в [42] для исследования окружающей природной среды. Полный объем использованного архива составил 2.9 Терабайта. Архив содержит более 80 различных переменных (включая атмосферное давление на уровне моря, влажность воздуха, солнечную радиацию) в нескольких координатных системах с 1948 г. по нынешнее время.

Таким образом, кластеризация является методом, интенсивно применяемым при анализе природно-климатических данных. Существует ещё много разновидностей методов кластеризации числовых данных, которые обладают как своими достоинствами, так и недостатками [43]. Тем не менее, у большинства из них есть общая черта – необходимость задавать количество кластеров до начала кластеризации, что существенно затрудняет обработку «сырых» данных и сужает возможности кластеризации.

В настоящей работе описывается разработанный авторами метод выделения структур, относящийся к методам кластерного анализа и позволяющий решить две задачи для рядов наблюдений:

- осуществить распределение анализируемых данных по структурам;
- выявить наличие в анализируемых данных заранее заданных структур.

Структуры в настоящем контексте – это математические объекты, отражающие совокупное проявление скрытых связей между исследуемыми данными, которые не всегда являются очевидными.

Формальное описание

Рассмотрим конечное множество объектов $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. Пусть каждый из объектов идентифицируется некоторой парой значений из пространства основных $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ и вспомогательных $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$ признаков. Общее пространство признаков обозначим как $X_\Omega = \{X, \Omega\}$. Построим матрицу расстояний $D = \|d_{ij}\|_{m \times m}$ между объектами $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, используя только элементы пространства основных признаков $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Причем вид функции, определяющей расстояние между любой парой объектов в построенном метрическом пространстве, может быть любым. Сформулируем некоторые абстрактные наборы требований к объектам $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. При каждом конкретном анализе такие ограничения (аксиомы) определяются целью проводимых исследований. Пусть A_X – набор ограничений, сформулированных в терминах пространства основных признаков $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Набор ограничений, сформулированных в пространстве вспомогательных признаков $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$, обозначим как A_Ω . Набор же ограничений, сформулированных только в терминах матрицы расстояний $D = \|d_{ij}\|_{m \times m}$ между объектами $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, обозначим как A_D . В принятых обозначениях полный набор всех возможных ограничений можно представить упорядоченной тройкой аксиом $R = \{A_X, A_\Omega, A_D\}$.

Таким образом, задачу выделения структур можно сформулировать как задачу поиска на множестве объектов $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ подмножеств (или структур), удовлетворяющих заданному набору ограничений из совокупности аксиом $R = \{A_X, A_\Omega, A_D\}$. В рассматриваемом варианте и $R = \{A_X, A_\Omega, A_D\}$ естественным образом формируются 8 классов наборов ограничений (типов аксиом):

$\{0, 0, 0\}, \{0, 0, 1\}, \{0, 1, 0\}, \{0, 1, 1\}, \{1, 0, 0\}, \{1, 0, 1\}, \{1, 1, 0\}, \{1, 1, 1\}$,

где цифры 0 и 1 указывают, на отсутствие или наличие соответствующих наборов ограничений из $R = \{A_X, A_\Omega, A_D\}$. Так, например, отсутствие каких-либо наборов ограничений $\{0, 0, 0\}$ определяет любое выделенное подмножество объектов из $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ структурой. В случае же $\{0, 0, 1\}$ для выделения структур используются ограничения, сформулированные в терминах расстояний между объектами. Например, аксиома из такого класса $A_D^\circ = \{\max d_{a_i a_j} \leq d_0, (a_i, a_j) \in A\}$ выделяет структуры объектов, в которых максимальное расстояние между любыми парами объектов $\max d_{a_i a_j}$ не превышает заданную норму d_0 . Выделенные таким образом структуры находятся внутри гиперповерхности с радиусом d_0 .

Аксиомы, сформулированные в терминах пространства основных признаков (A_X), а также в терминах пространства вспомогательных признаков (A_Ω), являются, по сути, абстрактными координатами гиперсфер, разбивающих множество объектов $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ на несвязные подмножества $\{U_1, U_2, \dots, U_k\}$. При этом элементы несвязных подмножеств принадлежат множеству объектов A :

$U_1, U_2, \dots, U_k \in \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, пересечение несвязных подмножеств – пустое подмножество: $U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_k = \emptyset$, а их объединение есть само множество A : $U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_k = A$.

Алгоритм выделения структур

Для описания алгоритма выделения структур воспользуемся формализмами теории графов. Поскольку решаемая задача выделения структур хорошо отождествляется с задачей нахождения всех компонентов связности в неориентированном графе, в которой необходимо разбить вершины графа на несколько групп так, чтобы внутри одной группы можно было пройти от одной вершины до любой другой, а между разными группами такого бы пути не существовало.

Сопоставим с каждым объектом $a_i, i=1, \dots, m$ из множества $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ вершину v_i некоторого графа $G=(V, E)$. С каждым ребром $e_{ij}=(e_i, e_j) \in E: i, j=1, \dots, m$, связывающим вершины v_i и v_j , сопоставим абстрактную стоимость c_{ij} , равную расстоянию $d_a d_{aj}$ между соответствующими объектами a_i и a_j в матрице расстояний $D=\|d_a d_{aj}\|_{m \times m}$. Для начального состояния, с которого алгоритм выделения структур начинает работать, возможны два варианта – начальное состояние есть полный граф или начальное состояние есть пустой граф.

В случае, когда множество объектов определяют начальное состояние в виде полного графа $G=(V, E)$, для каждой пары вершин $(v_i, v_j) \in V: i, j=1, \dots, m$ существует ребро e_{ij} , инцидентное вершине v_i и инцидентное вершине v_j (все вершины графа соединены ребрами между собой). Последовательное удаление из графа ребер e_{ij} , значения которых больше заданного порога d_p^t , приведет к получению на каждом шаге графа уровня t , равного $G^t=(V, E^t)$, для множества ребер которого справедливо $E^t=\{e_{ij} \in E: c_{ij} \leq d_p^t\}$. Процесс уменьшения порога d_p^t приведет к ситуации, когда при некотором значении $d_p^{t^*}$ исходный граф $G=(V, E)$ превратится в несвязный и появится связанное с $d_p^{t^*}$ некоторое количество k_t подграфов $G_1^t, G_2^t, \dots, G_{k_t}^t$ – компонентов связности. Достаточно очевидно, что в общем случае число вершин у подграфов $G_1^t, G_2^t, \dots, G_{k_t}^t$ – различное, вплоть до наличия подграфов с одной вершиной, а продолжение процесса уменьшения порога d_p^t будет приводить к увеличению компонентов связности исходного графа $G=(V, E)$, т. е. к увеличению количества связных подграфов.

В случае, когда множество объектов определяют начальное состояние в виде вполне несвязного графа (пустого графа) $G=(V)$, последовательное добавление в этот граф ребер e_{ij} , значения которых меньше заданного порога d_p^t , также приведет к получению на каждом шаге графа уровня t , равного $G^t=(V, E^t)$, для множества ребер которого справедливо $E^t=\{e_{ij} \in E: c_{ij} \leq d_p^t\}$. А процесс увеличения порога d_p^t приведет к ситуации, когда при некотором значении $d_p^{t^{**}}$ исходный граф $G=(V)$ превратится в связный и появится связанное с $d_p^{t^{**}}$ некоторое ко-

личество k_t подграфов $G_1^t, G_2^t, \dots, G_{k_t}^t$ – компонентов связности. Дальнейшее увеличение порога d_p^t приведет к уменьшению компонентов связности $G_1^t, G_2^t, \dots, G_{k_t}^t$ и числа изолированных вершин и при некотором значении порога $d_p^{t^*}$ исходный пустой граф $G=(V)$ превратится в связный граф $G=(V, E)$.

Определение. Компонент связности, появившийся на некотором шаге t и удовлетворяющий априори заданному набору ограничений из совокупности $R=\{A_x, A_\Omega, A_D\}$, называется структурой $S=\{v: v=V_a^t, G_a^t=(V_a^t, E_a^t), c_a^t \leq d_p^t\}$.

Каждая структура характеризуется максимальным d_{\max}^k и минимальным d_{\min}^k пороговыми значениями расстояния. Минимальное значение порога d_{\min}^k определяет условия, при которых из компонента связности выходит одна или несколько вершин, т. е. структура $S=\{v: v=V_a^t, G_a^t=(V_a^t, E_a^t), c_a^t \leq d_p^t\}$ разрушается. Таким образом, d_{\min}^k характеризует компактность подграфов $G_1^t, G_2^t, \dots, G_{k_t}^t$, причем, чем меньше величина d_{\min}^k , тем существеннее в некотором смысле связь между компонентами связности. Максимальное же значение порога d_{\max}^k определяет условия, характеризующие степень связанности $-i$ структуры с оставшейся частью исходного графа $G=(V, E)$. В частности, по величине $d_{\max}^k = \max(d_{\max}^k)$, $k=1, 2, \dots$ определяются условия выделения первого подграфа из $G=(V, E)$.

Таким образом, разность $d_{\max}^k - d_{\min}^k$ определяет степень изолированности структуры $S=\{v: v=V_a^t, G_a^t=(V_a^t, E_a^t), c_a^t \leq d_p^t\}$ от остальной части графа $G=(V, E)$. Причем выбор метрики расстояния d не является ключевым, так как в общем случае априори определить свойства исследуемого пространства достаточно сложно. По крайней мере, метрики Евклида и Хемминга приводили к одинаковым результатам. А с вычислительной точки зрения евклидово расстояние – самое простое.

Результаты исследования

Для иллюстрации работы предложенного алгоритма кластеризации были привлечены средние месячные температуры воздуха 249 станций на территории северной части Евразии за период 1955–2010 гг. Сеть станций – неравномерная, более плотная на юге и западе исследуемой территории и менее плотная в Сибири и на севере. Районирование территории с использованием временных рядов средней месячной температуры имеет своей основной целью нахождение естественных структур, т. е. районов, обладающих похожим поведением температуры. Привязка полученных таким образом структур-классов к ландшафту позволяет приблизиться к оценке причин формирования и выделения однородных зон.

Ниже приведены результаты начальной (рис. 1), промежуточной (рис. 2) и конечной (рис. 3) стадий выделения структур с аномальной составляющей среднемесячной температуры по 90 станциям, находящимся в Сибирской части Северной Евразии.

Рис. 1 иллюстрирует результаты выделения структур при $d_p=0,5$. Состояние – близкое к начальному.

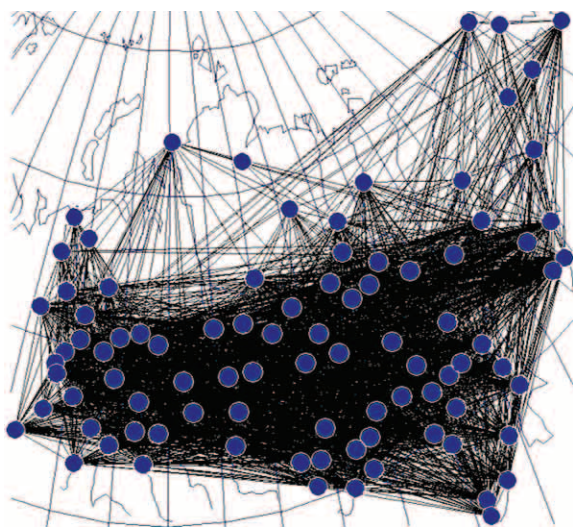


Рис. 1. Кластеризация при $d_p=0,5$

Fig. 1. Clustering at $d_p=0,5$

Дальнейшее уменьшение порогового значения расстояния иллюстрируется на рис. 2: в левой части – выделение в исходном графе двух компонентов связности, в правой части – выделение уже шести компонентов связности.

В финальной части выделения структур (рис. 3) присутствует 20 компонентов связности – 11 подграфов и 9 изолированных точек.

Заключение

Разработанный алгоритм кластеризации, примененный для классификации специфического геофизического поля средних месячных темпера-

тур воздуха, позволяет выделить в исследуемом пространстве отдельные автономные области и, следовательно, проводить более детальный анализ влияния ландшафта и подстилающей поверхности на их климат.

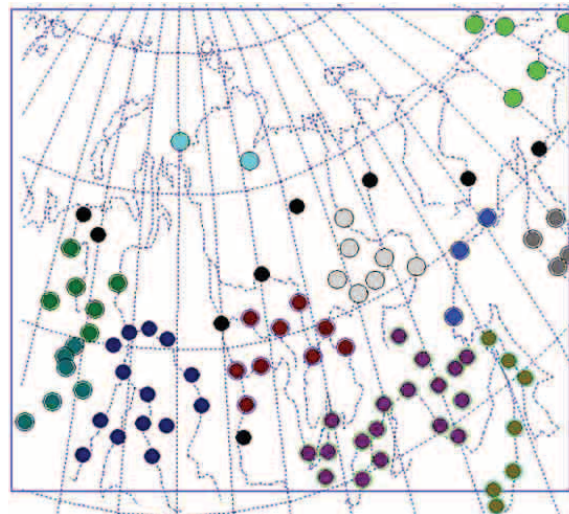


Рис. 3. Финальная стадия классификации

Fig. 3. Final stage of classification

Кроме того, использование предложенного алгоритма позволяет сформировать области, в которых изменение температуры похожее, а следовательно, и определить тенденции изменения температурных рядов (моменты изменения климата) не только в региональном, но и глобальном масштабах. Вычисление статистических характеристик температур в выделенных структурах (например, дисперсии и др.), дополнение их определенными универсальными характеристиками (например, зависящими от длины связи) дает возможность и количественно сравнивать отдельные структуры между собой.

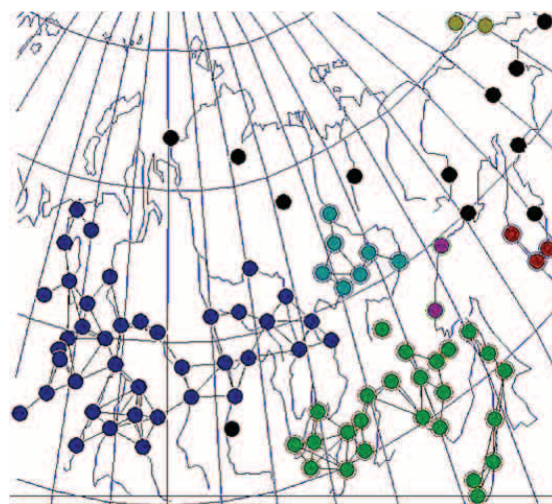
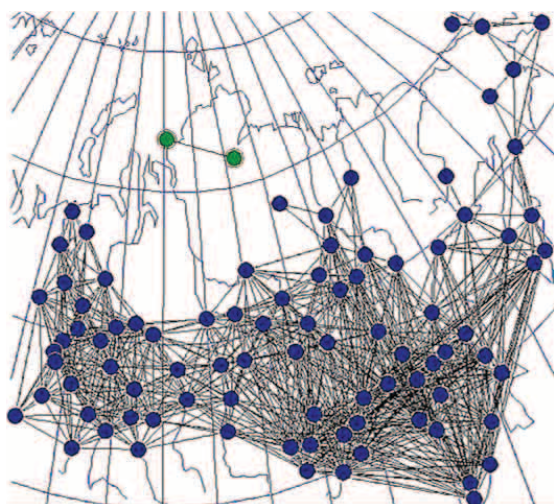


Рис. 2. Промежуточные стадии классификации

Fig. 2. Intermediate stages of classification

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологический словарь / под ред. К.Н. Паффенгольца. – М.: Недра, 1978. – Т. 2. – 456 с.
2. Köppen W. Das geographische system der klimate. – Berlin: Verlag von Gebrüder Bornträger, 1936. – 44 p.
3. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 582 с.
4. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // Известия АН СССР. Серия геогр. – 1959. – № 3. – С. 58–70.
5. Коробов В.Б., Васильев Л.Ю. Климатическое районирование территорий экспертно-статистическими методами. Постановка задачи // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 6. – С. 38–48.
6. Fovell R., Fovell M.-Y. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis // American Meteorological Society. – 1993. – № 6. – P. 2103–2135.
7. Mining and heavy metal pollution: assessment of aquatic environments in Tarkwa (Ghana) using multivariate statistical analysis / Armah F.A., Obiri S., Yawson D.O., Pappoe A.N.M., Akoto B. // Journal of Environmental Statistics. – 2010. – V. 1. – № 4. – P. 1–13.
8. Mrutu A., Luulo G.B. Data mining using multivariate statistical analysis. The case of heavy metals in sediments of the Msimbazi Creek mangrove wetland // Environmental Skeptics and Critics. – 2013. – V. 2 (4). – P. 153–163.
9. Boyles R., Raman S. Analysis of climate trends in North Carolina (1949–1998) // Environment International. – 2003. – V. 29. – P. 263–275.
10. A local search approximation algorithm for k-means clustering / T. Kanungo, D.M. Mount, N.S. Netanyahu, C.D. Piatko, R. Silverman, A.Y. Wu. // Computational Geometry: Theory and Applications. – 2004. – № 28. – P. 89–112.
11. Kalkstein L.S., Tan G., Skindlov J.A. An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification // Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1987. – V. 26. – P. 717–730.
12. Bretherton C.S., Smith C., Wallace J.M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data // J. of Climate. – 1992. – V. 5. – P. 541–560.
13. Northern Hemisphere atmospheric blocking as simulated by 15 atmospheric general circulation models in the period 1979–1988 / F. D’Andrea, S. Tibaldi, M. Blackburn, G. Boer, M. Deque, M.R. Dix, B. Dugas, L. Ferranti, T. Iwasaki, A. Kitoh, V. Pope, D. Randall, E. Roeckner, D. Straus, W. Stern, H. Van Den Dool, D.L. Williamson // Climate Dynamics. – 1998. – V. 14. – P. 385–407.
14. Катаев С.Г., Кусков А.И. Исследование озоновых полей над территорией России и сопредельных государств. I. Составляющие полей озона // Вестник ТГПУ. Сер.: Естественные и точные науки. – 1998. – Вып. 5. – С. 3–9.
15. Катаев С.Г., Кусков А.И. Исследование озоновых полей над территорией России и сопредельных государств. II. Классификация составляющих полей озона // Вестник ТГПУ. Сер.: Естественные и точные науки. – 1998. – Вып. 1. – С. 10–17.
16. Кусков А.И., Катаев С.Г. Закономерности современных изменений теплового поля в приземном слое атмосферы Сибири и на Дальнем Востоке // Известия вузов. Физика. – 2004. – № 11. – С. 81–92.
17. Кусков А.И., Катаев С.Г. Структура и динамика приземного температурного поля над азиатской территорией России. – Томск: Изд-во ТГПУ, 2006. – 176 с.
18. Wu A.M., Hsieh W.W., Zwiers F.W. Nonlinear modes of North American winter climate variability derived from a general circulation model simulation // J. of Climate. – 2003. – V. 16. – P. 2325–2339.
19. Wu A.M., Hsieh W.W. Nonlinear interdecadal changes of the El Niño-Southern oscillation // Climate Dynamics. – 2003. – V. 21. – P. 719–730.
20. Wu A.M., Hsieh W.W. Nonlinear canonical correlation analysis of the tropical Pacific wind stress and sea surface temperature // Climate Dynamics. – 2002. – V. 19. – P. 713–722.
21. Barnett T.P., Preisendorfer R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis // Monthly Weather Review. – 1987. – V. 115 (9). – P. 1825–1850.
22. Roswintarti O., Niyogi D.S., Raman S. Tele-connections between tropical Pacific sea surface temperature anomalies and North Carolina precipitation anomalies during El Niño events // Geophys. Res. Lett. – 1998. – V. 25. – P. 4201–4204.
23. Correlation study of time-varying multivariate climate data sets / J. Sukharev, C. Wang, K.L. Ma, A.T. Wittenberg // Proceeding of IEEE VGTC Pacific Visualization Symposium. – Beijing, 2009. – P. 161–168.
24. Cannon A.J., Hsieh W.W. Robust nonlinear canonical correlation analysis: application to seasonal climate forecasting Nonlin // Processes Geophys. – 2008. – V. 15. – P. 221–232.
25. Livezey R.E., Smith T.M. Considerations for use of the Barnett and Preisendorfer algorithm for canonical correlation analysis of climate variations // J. of Climate. – 1999. – V. 12. – P. 303–305.
26. Barnett T.P., Preisendorfer R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis // Mon. Weather Rev. – 1987. – V. 115. – P. 1825–1850.
27. Barnston A.G., Ropelewski C.F. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis // J. of Climate. – 1992. – V. 5. – P. 1316–1345.
28. The NCEP climate forecast system / S. Saha, S. Nadiga, C. Thiaw, J. Wang, W. Wang, Q. Zhang, H.M. van den Dool, H.-L. Pan, S. Moorthi, D. Behringer, D. Stokes, M. Pena, S. Lord, G. White, W. Ebisuzaki, P. Peng, P. Xie // J. of Climate. – 2006. – V. 19. – P. 3483–3517.
29. Seasonal climate: forecasting and managing risk / A. Troccoli, M. Harrison, D.L.T. Anderson, S.J. Mason. – Dordrecht: Springer Science, 2008. – 461 p.
30. Greenfield R.S., Fisher G.M. Improving responses to climate predictions – an introduction // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2003. – V. 84. – P. 1685–1685.
31. Harrison M.S. The development of seasonal and interannual climate forecasting // Climatic Change. – 2005. – V. 70. – P. 201–220.
32. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate / T.N. Krishnamurti, C.M. Kishtawal, Zh. Zhang, T. Larow, D. Bachiochi, E. Williford // J. of Climate. – 2000. – V. 13. – P. 4196–4216.
33. Kim K.Y., North G.R. EOF-based linear prediction algorithm: examples // J. of Climate. – 1999. – V. 12. – P. 2076–2092.
34. Kim K.Y., Wu Q. A comparison study of EOF techniques: analysis of nonstationary data with periodic statistics // J. of Climate. – 1999. – V. 12. – P. 185–199.
35. Forecasting ENSO events: a neural network extended EOF approach / F.T. Tangang, B.Y. Tang, A.H. Monahan, W.W. Hsieh // J. of Climate. – 1998. – V. 11. – P. 29–41.
36. Поляков Д.В., Кужевская И.В. Применение кластерного анализа для оценки температурно-влажностных условий в период активной вегетации на территории юга Западной Сибири и его связь с гидротермическим коэффициентом Т.Г. Селянинова // Вестник Том. гос. ун-та. – 2012. – № 360. – С. 188–192.
37. Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П. Прогноз низкой облачности на аэродромах европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 1. – С. 12–31.
38. Овечкин С.В., Майнашева Г.М. Опыт использования кластерного анализа при климатическом районировании Московской области // Вестник МГПУ. Серия: Естественные науки. – 2010. – № 2 (6). – С. 65–74.

39. Вершовский Е.А. Разработка методов и алгоритмов кластеризации мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 2010. – 17 с.
40. Кирста Ю.Б., Курепина Н.Ю., Ловцкая О.В. Пространственная декомпозиция метеорологических полей Евразии: разделение воздействий растительности и антропогенной деятельности // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5. – С. 1030–1036.
41. Дробушевская О.В., Царегородцев В.Г. Географо-климатические варианты светлохвойных травяных лесов Сибири // Сибирский экологический журнал. – 2007. – № 2. – С. 211–219.
42. Родригес Залепинос Р.А. Данные и методы интеллектуального анализа данных для исследования окружающей природной среды // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2011. – Вып. 1. – С. 94–107.
43. Нейский И.М. Классификация и сравнение методов кластеризации // Научно-образовательный кластер CLAIM. URL: http://it-claim.ru/Persons/Neyskiy/Article2_Neyskiy.pdf (дата обращения: 03.06.2015).

Поступила: 17.11.2015 г.

UDC 551.501

AN APPROACH TO CLUSTERING OBJECTS

Igor A. Botygin,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: bia@tpu.ru

Sergey G. Kataev,

Tomsk State Pedagogical University, 60, Kievskaya Street, Tomsk, 634061, Russia. E-mail: sgkataev@sibmail.com

Valeriy A. Tartakovskiy,

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskij Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: trtk@list.ru

Anna I. Sherstneva,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: sherstneva@tpu.ru

Relevance of the work is due to the need to develop universal information-analytical approaches to extract knowledge from the rapidly growing volume of geophysical data. One of the main problems in the processing of geophysical data is to find in it objectively existing laws which could become the basis for diverse, including forward-looking, behavior models of selected parameters of geophysical fields. And that data clustering technologies are the foundation for the software development of similar information systems analysis of unstructured data.

The main aim of the study is to develop a method of experimental data clustering of geophysical nature on the basis of allocation of structures for solving problems of the analysis of unstructured information when studying and controlling complex systems.

The methods used in the study: classical and modern methods and clustering algorithms, graph theory algorithms, test case of clustering of a geophysical field of meteorological parameters from the territory of the northern part of Eurasia.

The results. The authors developed a new algorithm of structures allocation in the initial geophysical field, which allows decomposing the test space into fields with the same behavior of the studied parameters based on spatial characteristics. The algorithm is based on the structuring of the various expansions of geophysical fields (season, anomaly, etc.) and provides a wide range of information on the object in the form of sets of parameters of the selected structures. This information, along with the accompanying empirical relationship between the parameters is considered as a generalization of the experimental characterization of the object and is the basis for the formation of hypotheses and behavior models. In addition, a structural model of the space of a meteorological parameter provides the ability to compress primary data without significant loss of semantic value of the target geophysical field.

Key words:

Geophysical field, clustering, graph theory, structure, method of allocation of structures, weather observations, time series.

REFERENCES

1. *Geologicheskii slovar* [Geological dictionary]. Ed. by K.N. Paf-fengolts. Moscow, Nedra Publ., 1978, vol. 2. 456 p.
2. Köppen W. *Das geographische system der klimare.* – Berlin: Verlag von Gebrüder Bornträger, 1936. 44 p.
3. Khromov S.P., Petrosyants M.A. *Meteorologiya i klimatologiya* [Meteorology and climatology]. Moscow, Moscow State University Publ., 2004. 582 p.
4. Grigorev A.A., Budyko M.I. Klassifikatsiya klimatov SSSR [Climate classification of USSR]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geogr.*, 1959, no. 3, pp. 58–70.
5. Korobov V.B., Vasilev L.Yu. Klimaticheskoe rayonirovanie territoriy ekspertno-statisticheskimi metodami. Postanovka zadachi [Climatic zoning of territories by expert and statistical methods. Formulation of the problem]. *Russian meteorology and hydrology*, 2004, no. 6, pp. 38–48.
6. Fovell R., Fovell M.-Y. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis. *American Meteorological Society*, 1993, no. 6, pp. 2103–2135.
7. Armah F.A., Obiri S., Yawson D.O., Pappoe A.N.M., Akoto B. Mining and heavy metal pollution. Assessment of aquatic environments in Tarkwa (Ghana) using multivariate statistical analysis. *Journal of Environmental Statistics*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 1–13.
8. Mrutu A., Luilo G.B. Data mining using multivariate statistical analysis. The case of heavy metals in sediments of the Msimbazi Creek mangrove wetland. *Environmental Skeptics and Critics*, 2013, vol. 2 (4), pp. 153–163.
9. Boyles R., Raman S. Analysis of climate trends in North Carolina (1949–1998). *Environment International*, 2003, vol. 29, pp. 263–275.
10. Kanungo T., Mount D.M., Netanyahu N.S., Piatko C.D., Silverman R., Wu A.Y. A local search approximation algorithm for k-means clustering. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 2004, no. 28, pp. 89–112.
11. Kalkstein L.S., Tan G., Skindlov J.A. An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1987, vol. 26, pp. 717–730.
12. Bretherton C.S., Smith C., Wallace J.M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. of Climate*, 1992, vol. 5, pp. 541–560.
13. Andrea F.D., Tibaldi S., Blackburn M., Boer G., Deque M., Dix M.R., Dugas B., Ferranti L., Iwasaki T., Kitoh A., Pope V., Randall D., Roeckner E., Straus D., Stern W., Van den Dool H., Williamson D.L. Northern Hemisphere atmospheric blocking as simulated by 15 atmospheric general circulation models in the period 1979–1988. *Climate Dynamics*, 1998, vol. 14, pp. 385–407.
14. Kataev S.G., Kuskov A.I. Issledovanie ozonnykh poley nad territoriy Rossii i sopredelnykh gosudarstv. I. Sostavlyayushchie poley ozona [Ozone research fields over the territory of Russia and neighboring countries. I. Components of ozone fields]. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin. Natural Sciences*, 1998, iss. 5, pp. 3–9.
15. Kataev S.G., Kuskov A.I. Issledovanie ozonovykh poley nad territoriy Rossii i sopredelnykh gosudarstv. II. Klassifikatsiya sostavlyayushchikh poley ozona [Ozone research fields over the territory of Russia and neighboring countries. II. Classification of components of ozone fields]. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin. Natural Sciences*, 1998, iss. 1, pp. 10–17.
16. Kuskov A.I., Kataev S.G. Zakonomernosti sovremennykh izmeneniy teplovogo polya v prizemnom sloe atmosfery Sibiri i na Dalnem Vostoke [Laws of modern changes of the thermal field in the surface layer the atmosphere of Siberia and the Far East]. *Russian Physics Journal*, 2004, no. 11, pp. 81–92.
17. Kuskov A.I., Kataev S.G. *Struktura i dinamika prizemnogo temperaturnogo polya nad aziatskoy territoriy Rossii* [Structure and dynamics of the surface temperature field over the Asian territory of Russia]. Tomsk, TSPU Publ., 2006. 176 p.
18. Wu A.M., Hsieh W.W., Zwiers F.W. Nonlinear modes of North American winter climate variability derived from a general circulation model simulation. *J. of Climate*, 2003, vol. 16, pp. 2325–2339.
19. Wu A.M., Hsieh W.W. Nonlinear interdecadal changes of the El Nino-Southern oscillation. *Climate Dynamics*, 2003, vol. 21, pp. 719–730.
20. Wu A.M., Hsieh W.W. Nonlinear canonical correlation analysis of the tropical Pacific wind stress and sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 2002, vol. 19, pp. 713–722.
21. Barnett T.P., Preisendorfer R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Monthly Weather Review*, 1987, vol. 115 (9), pp. 1825–1850.
22. Roswintarti O., Niyogi D.S., Raman S. Tele-connections between tropical Pacific sea surface temperature anomalies and North Carolina precipitation anomalies during El Niño events. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, vol. 25, pp. 4201–4204.
23. Sukharev J., Wang C., Ma K.L., Wittenberg A.T. Correlation study of time-varying multivariate climate data sets. *Proceeding of IEEE VGTC Pacific Visualization Symposium*, Beijing, 2009. pp. 161–168.
24. Cannon A.J., Hsieh W.W. Robust nonlinear canonical correlation analysis: application to seasonal climate forecasting Nonlin. *Processes Geophys.*, 2008, vol. 15, pp. 221–232.
25. Livezey R.E., Smith T.M. Considerations for use of the Barnett and Preisendorfer algorithm for canonical correlation analysis of climate variations. *J. of Climate*, 1999, vol. 12, pp. 303–305.
26. Barnett T.P., Preisendorfer R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Mon. Weather Rev.*, 1987, vol. 115, pp. 1825–1850.
27. Barnston A.G., Ropelewski C.F. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation-analysis. *J. of Climate*, 1992, vol. 5, pp. 1316–1345.
28. Saha S., Nadiga S., Thiaw C., Wang J., Wang W., Zhang Q., van den Dool H.M., Pan H.L., Moorthi S., Behringer D., Stokes D., Pena M., Lord S., White G., Ebisuzaki W., Peng P., Xie P. The NCEP climate forecast system *J. of Climate*, 2006, vol. 19, pp. 3483–3517.
29. Troccoli A., Harrison M., Anderson D.L.T., Mason S.J. *Seasonal climate: forecasting and managing risk*. Dordrecht, Springer Science, 2008. 461 p.
30. Greenfield R.S., Fisher G.M. Improving responses to climate predictions an introduction. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2003, vol. 84, pp. 1685–1685.
31. Harrison M.S. The development of seasonal and interannual climate forecasting. *Climatic Change*, 2005, vol. 70, pp. 201–220.
32. Krishnamurti T.N., Kishtawal C.M., Zhang Z., Larow T., Bachiocchi D., Williford E. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *J. of Climate*, 2000, vol. 13, pp. 4196–4216.
33. Kim K.Y., North G.R. EOF-based linear prediction algorithm: examples. // *J. of Climate*, 1999, vol. 12, pp. 2076–2092.
34. Kim K.Y., Wu Q. A comparison study of EOF techniques: analysis of nonstationary data with periodic statistics. *J. of Climate*, 1999, vol. 12, pp. 185–199.
35. Tangang F.T., Tang B.Y., Monahan A.H., Hsieh W.W. Forecasting ENSO events: a neural network extended EOF approach. *J. of Climate*, 1998, vol. 11, pp. 29–41.
36. Polyakov D.V., Kuzhevskaya I.V. Primenenie klasternogo analiza dlya otsenki temperaturno-vlazhnostnykh usloviy v period aktivnoy vegetatsii na territorii yuga Zapadnoy Sibiri i ego svyaz s gidrotermicheskim koeffitsientom T.G. Selyaninova [Application of cluster analysis to estimate the temperature and humidity con-

- ditions during the active growing season in the south of Western Siberia and its relation to hydrothermal coefficient of T.G. Selyaninov]. *Bulletin of Tomsk State University*, 2012, no. 360, pp. 188–192.
37. Vetrova E.I., Skriptunova E.N., Shakina N.P. Prognoz nizkoy oblachnosti na aerodromakh evropeyskoy territorii byvshego SSSR [The forecast of low cloud at aerodromes of European territory of the former USSR]. *Russian meteorology and hydrology*, 2013, no. 1, pp. 12–31.
 38. Ovechkin S.V., Maynasheva G.M. Opyt ispolzovaniya klasternogo analiza pri klimaticheskom rayonirovaniy Moskovskoy oblasti [Experience in the use of cluster analysis in the climatic zone of the Moscow region]. *Bulletin of Moscow State Pedagogical University. Natural Sciences*, 2010, no. 2 (6), pp. 65–74.
 39. Vershovskiy E.A. *Razrabotka metodov i algoritmov klasterizatsii multispektralnykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli*. Avtoref. Kand. nauk [Development of methods and algorithms for clustering multispectral data of remote sensing of Earth. Cand. Sc. Abstract]. Taganrog, 2010. 17 p.
 40. KIRSTA Yu.B., Kurepina N.Yu., Lovtskaya O.V. Prostranstvennaya dekompozitsiya meteorologicheskikh poley Evrazii: razdelenie vozdeystviy rastitelnosti i antropogennoy deyatelnosti [The spatial decomposition of meteorological fields in Eurasia: the separation effects of vegetation and human activities]. *Fundamental Research*, 2014, no. 5, pp. 1030–1036.
 41. Drobusevskaya O.V., Tsaregorodtsev V.G. Geografo-klimaticheskie varianty svetlokhvoynnykh travyanykh lesov Sibiri [Geographic and climatic variations of herbal coniferous forests of Siberia]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2007, no. 2, pp. 211–219.
 42. Rodrigues Zalepinos R.A. Dannye i metody intellektualnogo analiza dannykh dlya issledovaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy [Data and data mining techniques for the study of the natural environment]. *System analysis and information technologies in the sciences of nature and society*, 2011, iss. 1, pp. 94–107.
 43. Neyskiy I.M. Klassifikatsiya i sravnenie metodov klasterizatsii [Classification and comparison of clustering methods]. *Nauchno-obrazovatelnyy klaster CLAIM*. Available at: http://it-claim.ru/Persons/Neyskiy/Article2_Neyskiy.pdf (accessed 3 June 2015).

Received: 17 November 2015.

УДК 504: 504.05:574.4

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА ОБЬ-ТОМСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ С УЧЕТОМ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Панченко Екатерина Михайловна,

кандидат географических наук, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. E-mail: pakatya@sibmail.com

Дюкарев Анатолий Григорьевич,

доктор географических наук, доцент, заведующий отделением экологических исследований Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. E-mail: DAG@imces.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки территории Обь-Томского междуречья для разработки мер по эффективному использованию территории для сохранения природного комплекса и неконфликтной хозяйственной и рекреационной деятельности.

Цель работы. Оценить эколого-хозяйственный баланс Обь-Томского междуречья на современном этапе.

Методы исследования. Метод оценки эколого-хозяйственного баланса с учетом антропогенной нагрузки. Для исследования состояния объекта регионального масштаба выбор в качестве основы анализа структуры земель представляется наиболее адекватным, поскольку именно устройство землепользования объективно отражает современное состояние промышленного, сельскохозяйственного и рекреационного воздействия.

Результаты работы. В результате проведенных исследований на основе предварительных расчетов, экспертных оценок и анализа современного состояния различных видов земель и типов землепользования на исследуемой территории предложена их классификация для Обь-Томского междуречья. Здесь к традиционно используемым в расчетах категориям был добавлен ряд специфических типов антропогенных воздействий (например, эксплуатация подземных источников водоснабжения). Проведена комплексная оценка эколого-хозяйственного баланса территории Обь-Томского междуречья по соотношению основных категорий землепользования, с учетом интенсивности антропогенной нагрузки. Проанализированы основные негативные факторы воздействия на разные участки территории. На этой основе рассчитаны коэффициенты относительной и абсолютной напряженности территории. Определен коэффициент естественной защищенности территории и проанализированы намечающиеся тенденции по изменению эколого-хозяйственного состояния. Проведенные расчеты показывают, что состояние территории исследования в настоящий момент в целом можно определить как умеренно преобразованное, но явно проявляется тенденция усиления негативных явлений – идет приращение земель, подверженных антропогенному воздействию.

Ключевые слова:

Эколого-хозяйственный баланс, антропогенная нагрузка, экологическая оценка, коэффициенты относительной и абсолютной напряженности территории, коэффициент естественной защищенности, Обь-Томское междуречье.

В настоящий период природная среда находится под динамичным воздействием сложного комплекса естественных и антропогенных факторов. Сильная пространственно-временная изменчивость влияющих процессов является серьезным препятствием для выбора приоритетных объективных показателей при проведении экологических исследований. При снижении ресурсного потенциала в разной степени повышаются затраты на его использование и воспроизводство, что приводит не только к быстрому изменению темпов и структуры потребления природных запасов, но и социального устройства территории [1]. Наиболее сложным представляется анализ объектов регионального масштаба, где непосредственно возникает необходимость принятия конкретных мер по ликвидации или смягчению негативных последствий и где сходятся противоречия между различными категориями природопользователей [2].

И как бы ни были разработаны подходы в реализации идеи об устойчивом развитии в глобальном масштабе [3, 4], основной узел проблем и противоречий, поиск путей их решения находится на конкретных территориях. Как подчеркивал в своих публикациях В.А. Коптюг: «Когда доходит дело до того места, где живешь, и надо решать все вопросы, в том числе экономического развития, начинает взвешиваться баланс: социальный, экономический и экологический. Решать все проблемы надо в рамках именно этой триады» [5].

Отсюда адаптация сформированных теоретических идей и создание обоснованных методов регионального управления природопользованием должны быть основаны на базе знаний современного состояния территории. Экологическое состояние любого объекта окружающей среды определяется сложным взаимодействием природы и общества. Для оценок антропогенного влияния зачастую рас-

считывают только количественные показатели загрязнения отдельных сред (воды, почв, воздуха) различными ингредиентами. Однако при комплексном анализе определенной территории этого явно недостаточно, а при разработке правовых документов и реальных мер на региональном уровне и не всегда возможно. Действительно, зачастую загрязнение речных вод, почв и атмосферного воздуха определяется трансграничными переносами и здесь областными и муниципальными органам приходится изыскивать особые пути решения проблем. В частности, в г. Томске задача снабжения населения питьевой водой была решена не путем создания очистных сооружений для вод реки Томи, а доставкой воды из подземных источников.

Приступая к анализу, необходимо оценить разнобразные аспекты природопользовательской деятельности, которая, на наш взгляд, в первую очередь характеризуется сложившейся на территории структурой землепользования [6]. Поэтому здесь в основу подхода, для оценки эколого-хозяйственного баланса и соответствующего информационного обеспечения выбора методов и средств сохранения экологического равновесия на исследуемой территории, положен анализ сложившегося соотношения различных видов земель и типов землепользования.

Это продиктовано следующими соображениями:

1. Существующая структура использования земельного фонда объективно отражает современное состояние промышленного, сельскохозяйственного и рекреационного использования территории.
2. Преобразование этой структуры, как правило, происходит более медленными темпами, чем иные негативные воздействия на окружающую среду, связанные с трансграничными переносами, изменениями в социальных запросах населения и т. д., что дает возможность на базе проведенного анализа эколого-хозяйственного баланса осуществить разработку и реализацию в разумное время реальных природоохранных мер.
3. Земельные ресурсы являются одним из важных видов георесурсов, поэтому исследование состояния и дальнейшее прогнозирование ситуации их развития является приоритетной задачей.
4. И самое главное, что именно земельный фонд находится в правовом поле и компетенции управления региональных, муниципальных и местных административных органов на исследуемой территории.

Эколого-хозяйственный баланс (ЭХБ) территории будем рассматривать как гармоничное соотношение различных видов антропогенной деятельности различных групп населения на территории с учетом потенциальных возможностей природы, что должно оптимально минимизировать возможные негативные последствия и обеспечить устойчивое развитие природы и общества [7].

Обоснованный анализ состояния эколого-хозяйственного баланса территории дает основу для оценки существующих и зарождающихся наиболее острых проблем и разработки соответствующих управленческих мер, обеспечивающих экологически устойчивое региональное развитие с учетом сложившейся структуры хозяйственной деятельности и конкретных ландшафтно-экологических условий. В нашей стране уже существует определенный опыт оценки ЭХБ для разных территорий (см. например: Воронежская область [8], Волгоградская область [9], Республики Мордовия [10], Татарстан [11], Орловская область [12] и др.).

Методы исследования

Методические подходы оценки эколого-хозяйственного баланса территории разработаны Б.И. Кочуровым, Ю.Г. Ивановым [13, 6], где учитываются следующие характеристики: распределение земель по категориям и видам, их площадь и степень антропогенной нагрузки, площадь природоохранных зон, напряженность эколого-хозяйственного состояния территории, интегральная антропогенная нагрузка, природная защищенность территории, экологический фонд территории. Здесь для оценки ЭХБ на первом этапе определяют уровень антропогенной нагрузки (АН), при этом на основе экспертных оценок каждому виду земель с учетом его экологического состояния присваивается соответствующий балл (табл. 1).

Затем на основе расчета индекса антропогенной нагрузки (АН_n) по формуле (1) определяется степень АН каждой природной местности [6]:

$$АН_n = r \cdot S_r, \quad (1)$$

где r – балл антропогенной нагрузки; S_r – доля данной категории земель в общей площади природного комплекса, %.

Далее рассчитываются коэффициенты абсолютной (K_A) и относительной (K_0) напряженности территории, то есть отношение площади земель с высокой АН к площади с более низкой АН [6]:

$$K_A = АН_5 / АН_1. \quad (2)$$

Значение коэффициента K_A позволяет оценить ситуацию только по «крайним» критериям. Для более подробного анализа степени сбалансированности территории по структуре землепользования и природно-экологическому потенциалу рассчитывается K_0 [6]:

$$K_0 = (АН_3 + АН_4 + АН_5) / (АН_1 + АН_2). \quad (3)$$

При уменьшении степени и площади земель, подверженных этому воздействию, значение коэффициентов K_A и K_0 убывает, и при K_0 , равном или близком к 1, эколого-хозяйственная ситуация может оцениваться как сбалансированная по степени АН и потенциалу устойчивости природы [13].

Известно, что для различных факторов антропогенного влияния существует свой лимит устойчивости природных и природно-антропогенных

ландшафтов, и чем разнообразнее ландшафт, тем он более устойчив. В площадном выражении это отражается, прежде всего, в количестве и равномерном распределении малонарушенных участков, природоохранных зон, т. е. экологического фонда территории. Чем больше эта величина, тем выше естественная защищенность (ЕЗ) территории и выше устойчивость ландшафта.

Таблица 1. Классификация земель по степени антропогенной нагрузки [7]

Table 1. Classification of lands by degree of anthropogenic load [7]

Степень АН Degree of AL	Балл Point of AL	Группа земель Group of lands
Низкая Low	1	Леса и неиспользуемые земли Forests and unused lands
Незначительная Light	2	Земли под водой, болота Lands under water, bogs
Средняя Medium	3	Пастбища, сенокосы, многолетние насаждения Grasslands, hayfields, perennial plantation
Значительная Significant	4	Пашни Agricultural lands
Высокая High	5	Земли промышленности, транспорта, инфраструктуры, городской и сельской застройки, свалки, нарушенные земли Industrial lands, roads, lands of infrastructure, urban and rural areas, disposal sites, disturbed lands

Очевидно, что земли, испытывающие высокую степень антропогенного воздействия, имеют и самую низкую естественную защищенность. Если площадь земель, входящих в экологический фонд с минимальной АН, принять за P_1 , то площади земель с условной оценкой степени АН в 2, 3 и 4 балла будут составлять $0,8P_2$, $0,6P_3$, $0,4P_4$ (земли с высоким баллом АН в расчет не принимаются) [6]. Таким образом оценивается $P_{сф}$ – суммарная площадь земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями (4):

$$P_{сф} = P_1 + 0,8P_2 + 0,6P_3 + 0,4P_4, \quad (4)$$

где 0,8, 0,6 и 0,4 – понижающие коэффициенты; P_1 , P_2 , P_3 , P_4 – земли, входящие в экологический фонд, с условной оценкой степени АН в 1, 2, 3, 4 балла.

Далее для комплексной оценки территории применяется интегральный коэффициент естественной защищенности территории ($K_{ЕЗ}$), который определяется по формуле [6]:

$$K_{ЕЗ} = P_{сф} / P_0, \quad (5)$$

где P_0 – общая площадь исследуемой территории.

Отметим, что величина коэффициента $K_{ЕЗ}$ менее 0,5 уже свидетельствует о критическом уровне защищенности территории.

Объект и материалы исследования

В данной работе представлены результаты оценки эколого-хозяйственного баланса Обь-Томского междуречья (ОТМ) (рисунок). Объект исследования расположен рядом с Томском и Северском, на юге граничит с Новосибирской и Кемеровской областями, общая площадь – 364 тыс. га. Район с запада и востока ограничен реками Обь и Томь соответственно, южная граница проходит по реке Большая Черная. Здесь расположено 34 населенных пункта и проживает почти 3 % населения области.

Геоморфологическое строение, обширная гидрографическая сеть, климатические условия, высокое разнообразие почвенного и растительного покрова, ландшафтная структура определяют активную деятельность человека на территории. В силу специфики ресурсного и экологического потенциала исследуемый район выполняет ряд защитных функций. При многофункциональной эксплуатации территории неизбежно возникает напряженность между разными видами потребления природных ресурсов.

Проведенная нами оценка эколого-хозяйственного баланса Обь-Томского междуречья основана на материалах статистических сборников администрации Томской области, комитетов по земельным ресурсам и землеустройства. В процессе работы использовались картографические материалы: 1) топографические карты масштаба 1:100 000, выполненные в ГУГК при СМ СССР на основе АФС 1986 г. (6 листов); 2) план землеустройства масштаба 1:100 000, выполненный в ВИСХАГИ Роскомзем 1998 г. (1 лист); 3) карта-схема деления лесов по целевому назначению и категориям защитных лесов Тимирязевского лесничества масштаба 1:300 000, составленная Департаментом лесного хозяйства Томской области (2014) [14]; 4) карта ландшафтной структуры с отражением трансформированных территорий под воздействием Томского водозабора, составленная А.Г. Дюкаревым и Н.Н. Пологовой совместно с ОАО «Томскгеомониторинг» (2008) [15]; 5) космический снимок Landsat (США), мультиспектральный с пространственным разрешением 30 м.

Обсуждение результатов

Общая структура землепользования Обь-Томского междуречья представлена в табл. 2. Видно, что около 70 % территории относится к категории земель с низкой и незначительной антропогенной нагрузкой, а процент площади земель, испытывающих высокую и значительную нагрузку, весьма мал. При таком рассмотрении сложившуюся ситуацию на междуречье можно отнести к условно благополучной. В то же время первичная оценка не отражает главного – уровня антропогенной нагрузки на окружающую среду.

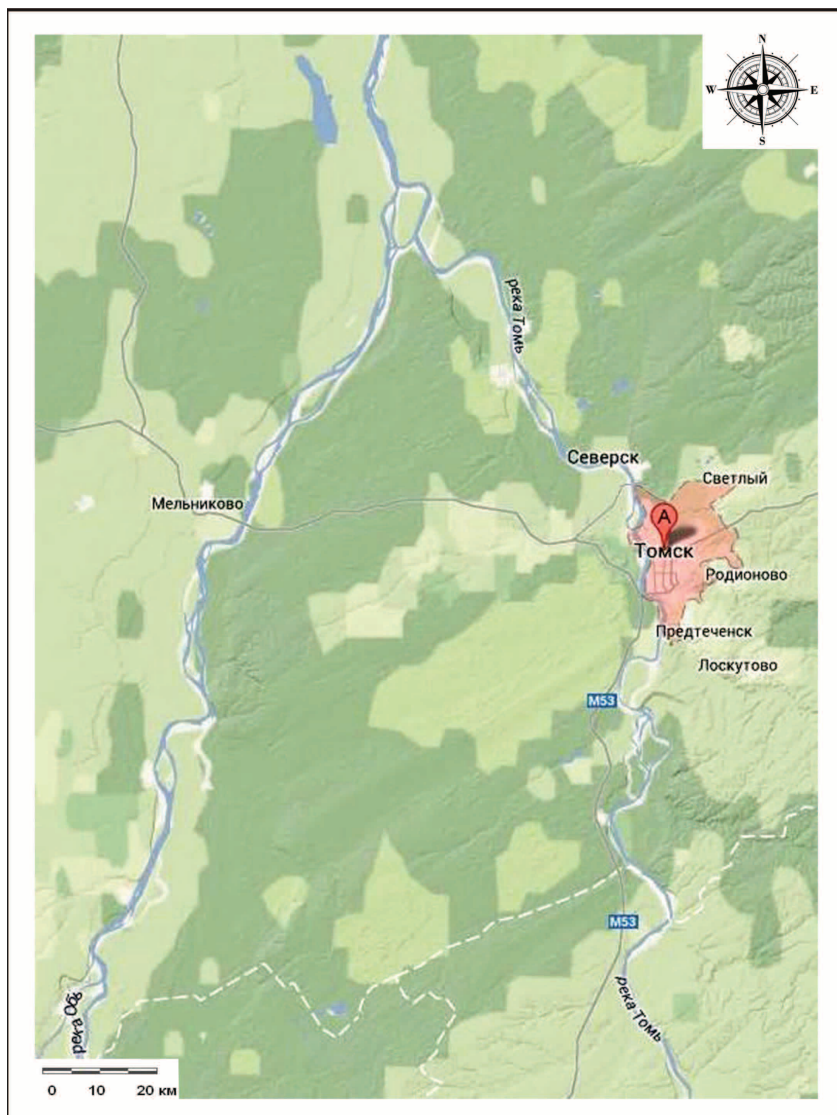


Рисунок. Объект исследования – Обь-Томское междуречье

Figure. Research subject is the territory of Ob-Tom interfluve

Если же применить систему экспертной оценки в баллах для каждого вида антропогенной нагрузки, то экологическое состояние Обь-Томского междуречья будет выглядеть совсем иначе.

Рассмотрим результаты расчета коэффициентов $АН_n$ для каждого вида земель:

$$АН_1=61,3; АН_2=16; АН_3=41,1; АН_4=36; АН_5=35.$$

Величина коэффициента абсолютной напряженности Обь-Томского междуречья

$$К_A^{OTM} = АН_5/АН_1 = 35/61,3 = 0,6.$$

Исходя из этого расчета, территорию междуречья можно отнести к устойчивой. Для более детальной оценки степени сбалансированности территории по структуре землепользования и природно-экологическому потенциалу рассчитывается $К_0^{OTM}$:

$$К_0^{OTM} = (АН_3 + АН_4 + АН_5) / (АН_1 + АН_2) = (41,1 + 36 + 35) / (61,3 + 16) = 1,5.$$

Если величина $К_0$ оказывается больше 1, то это свидетельствует о тенденции изменения эколого-хозяйственного баланса в сторону увеличения антропогенно преобразованных земель.

Далее нами произведен расчет коэффициента естественной защищенности ($К_{EZ}^{OTM}$):

$$P_{CF}^{OTM} = P_1 + 0,8P_2 + 0,6P_3 + 0,4P_4 = 223 + 23,44 + 29,88 + 13,92 = 290,24;$$

$$К_{EZ}^{OTM} = P_{CF}/P_0 = 290,24/364 = 0,8.$$

На основе приведенного расчета можно сделать вывод, что на территории Обь-Томского междуречья отмечается стабильная, удовлетворительная ситуация. Однако такая оценка является в определенной степени формальной и не может учесть важные специфические особенности ситуации на конкретной территории.

Для более подробного анализа эколого-хозяйственного баланса Обь-Томского междуречья нами

были выделены следующие наиболее значимые виды антропогенных воздействий на окружающую среду.

Таблица 2. Структура земельного фонда Обь-Томского междуречья [14]

Table 2. Land reserves structure of the territory of Ob-Tom interfluvium [14]

Категория земель Group of lands	Балл АН Point of AL	Всего по лесничеству Total on forestry	
		площадь, тыс. га area, thousands hectares	доля, % percent, %
Общая площадь земель Total area of lands		364	100
Леса и неиспользуемые земли Forests and unused lands	1	223	61,3
Земли под водой, болота Lands under water, bogs	2	29,3	8
Пастбища, сенокосы, многолетние насаждения Grasslands, hayfields, perennial plantation	3	49,8	13,7
Пашни Agricultural lands	4	34,8	9
Земли транспорта, инфраструктуры, населенных пунктов, нарушенные земли Industrial lands, roads, lands of infrastructure, urban and rural areas, disposal sites, disturbed lands	5	27,1	7

Для района исследования важным фактором является эксплуатация подземных источников водоснабжения. Под влиянием интенсивного водоотбора (откачка подземных вод достигает 200 тыс. м³ в сутки) на территории уже сформировалась воронка депрессии [16], наиболее глубокая в районе первой очереди водозабора. Проведенные исследования выявили, что наиболее трансформированы ландшафты в районе действия первой очереди водозабора [17, 18].

К основным составляющим негативных воздействий необходимо отнести и лесопользование. Общая площадь лесов составляет 220824 га, из них эксплуатируется 163500 га. Эксплуатация лесов началась давно, и на данный момент основная часть лесных массивов вырублена. По данным космомониторинга, на территории начиная с 2001 по 2013 г. произошла потеря лесных насаждений в количестве 17 тыс. га [19]. Следствием вырубки лесов является заметное снижение биологического разнообразия, экономической и экологической ценности территории. Вырубки характеризуются повышенной пожароопасностью и развитием эрозийных процессов.

Немаловажным является и то, что междуречье стабильно подвергается интенсивным рекреационным нагрузкам (туризм, воскресный отдых, сбор дикоросов). Обь-Томское междуречье имеет большой рекреационный потенциал, который опреде-

ляется доступностью территории и развитостью дорожных сетей, богатством природы. Ведущее место занимают сосняки зеленомошные, березово-сосновые леса, кедровники. В процессе рекреационного воздействия ослабляются внутренние связи между компонентами, что ведет к снижению устойчивости и трансформации структуры ландшафта, преобразованию в качественно иное состояние.

Серьезным последствием антропогенной деятельности является такой косвенный фактор, как **лесные пожары**, увеличение частоты возникновения которых преимущественно связано с усилением рекреационной нагрузки. Совокупное воздействие ряда причин, таких как наблюдающееся потепление климата, изменение гидрологического режима и усиливающаяся интенсивное освоение района как рекреационной пригородной зоны, заметно повышает пожароопасность на междуречье.

В результате проведенных исследований нами предложена несколько иная классификационная схема распределения земель (табл. 3), где к уже ранее выделенным категориям (табл. 2) добавили новые типы антропогенного воздействия.

Таблица 3. Классификация земель Обь-Томского междуречья по степени антропогенной нагрузки

Table 3. Classification of the territory of Ob-Tom interfluvium by degree of anthropogenic load

Степень АН Degree of AL	Балл Point of AL	Группа земель Group of lands
Низкая Low	1	Леса и неиспользуемые земли Forests and unused lands
Незначительная Light	2	Земли под водой, болота Lands under water, bogs
Средняя Medium	3	Пастбища, сенокосы, многолетние насаждения, припоселковые кедровники, природоохранные (рекреационные) территории Grasslands, hayfields, perennial plantation, siberian stone pine forests near settlements, conservation (recreation) zones
Значительная Significant	4	Пашня, территории, трансформированные под воздействием водозабора, гари Agricultural lands, transformed lands under the influence of water intake, burnt-out forests
Высокая High	5	Земли промышленности, транспорта, инфраструктуры, городской и сельской застройки; нарушенные земли, конфликтная зона Industrial lands, roads, lands of infrastructure, urban and rural areas, disposal sites, disturbed lands, conflict zone

Хотелось бы подчеркнуть, что на этом этапе исследований более детальное дробление в классификации земель вряд ли целесообразно, поскольку обоснование природоохранных мероприятий для отдельных локальных объектов междуречья представляет собой отдельный комплекс задач.

В предлагаемой схеме к территориям со **средней антропогенной нагрузкой** были отнесены земли природоохранного назначения, припоселковые кедровники, для которых характерны высокие сезонные воздействия населения (туризм, воскресный отдых, сбор дикоросов), что приводит к деградации естественной растительности, замусориванию территории, возникновению пожаров и т. п.

Значительная антропогенная нагрузка была присвоена группам земель, трансформированных под воздействием Томского водозабора. Здесь произошла сработка грунтовых и почвенно-грунтовых вод в перекрывающих основные водоносные горизонты слоев, иссушение грунтов в зоне аэрации, деградация болот, их постепенное выгорание и замещение лесными ландшафтами [16].

К территориям значительной антропогенной нагрузки отнесены и сельскохозяйственные территории, поскольку пашни, луга и сенокосы уже представляют полностью преобразованные территории. К этой же категории земель были также отнесены и гари.

Анализ структуры и факторов антропогенного влияния показал, что на территории междуречья существуют комплексные конфликтные зоны, где складывается несколько видов негативного воздействия. Особенно ярко это проявляется при сочетании негативных проявлений, связанных с воздействием водозабора и других видов антропогенных нагрузок: рекреации, лесопользования или земледелия. Этим наиболее трансформированным землям на данном этапе работы по нашей классификации была присвоена высокая степень антропогенной нагрузки (табл. 3).

При таком подходе принимаемая в расчетах площадь земель с низкой и незначительной нагрузкой уже снизилась до 50 % от общей площади междуречья (табл. 4).

Согласно таблице структуры территории (табл. 4) были осуществлены новые расчеты коэффициентов АН_г:

$$АН_1 = 44,1; АН_2 = 16;$$

$$\Sigma АН_3 = 61,5; \Sigma АН_4 = 54,4; \Sigma АН_5 = 65,5.$$

$$K_A^{OTM} = АН_5 / АН_1 = 65,5 / 44,1 = 1,5,$$

$$K_O^{OTM} = (АН_3 + АН_4 + АН_5) / (АН_1 + АН_2) = (61,5 + 54,4 + 65,5) / (44,1 + 16) = 3.$$

Как видим, при таком рассмотрении оценка эколого-хозяйственного баланса меняется заметным образом. Величина коэффициента K_A^{OTM} свидетельствует, что территория уже не может быть отнесена к благополучным. Значение K_O^{OTM} указывает на то, что здесь существует явно выраженная экологическая напряженность и территория является несбалансированной по степени и потенциалу устойчивости природы.

Теперь приведем расчет коэффициентов естественной защищенности территории (K_{EZ}^{OTM}):

$$P_1 = 160,7; P_2 = 29,3; P_3 = 74,6; P_4 = 51,5.$$

$$P_{CF}^{OTM} = P_1 + 0,8P_2 + 0,6P_3 + 0,4P_4 = 160,7 + 23,4 + 26,9 + 20,6 = 231,6,$$

$$K_{EZ}^{OTM} = P_{CF}^{OTM} / P_O^{OTM} = 231,6 / 364 = 0,6.$$

Таблица 4. Структура земельного фонда Обь-Томского междуречья

Table 4. Land reserves structure of the territory of Ob-Tom interfluvium

Категории земель Group of lands	Балл Point of AL	Всего по лесничеству Total on forestry	
		площадь, тыс. га area, thousands hectares	доля, % percent, %
Общая площадь земель Total area of lands		364	100
Леса и неиспользуемые земли Forests and unused lands	1	160,7	44,1
Земли под водой, болота Lands under water, bogs	2	29,3	8
Пастбища, сенокосы, многолетние насаждения Grasslands, hayfields, perennial plantation	3	49,8	13,7
Природоохранные (рекреационные) территории, припоселковые кедровники Conservation (recreation) zones, siberian stone pine forests near settlements	3	24,8	6,8
Пашня Agricultural lands	4	34,8	9,1
Территории, трансформированные под воздействием водозабора Transformed lands under the influence of water intake	4	12,2	3,3
Гари Burnt-out forests	4	4,5	1,2
Конфликтная зона Conflict zone	5	20,8	5,7
Земли транспорта, инфраструктуры, населенных пунктов, нарушенные земли Industrial lands, roads, lands of infrastructure, urban and rural areas, disposal sites, disturbed lands	5	27,1	7,4

В приведенных выше расчетах K_{EZ}^{OTM} для Обь-Томского междуречья оказался равным **0,6**. Если по этому коэффициенту формально оценить ситуацию на междуречье, то может сложиться впечатление о том, что до сих пор естественная защищенность рассматриваемой территории может оцениваться как удовлетворительная. В то же время близость рассчитанного коэффициента K_{EZ}^{OTM} к критической величине 0,5, полученного с учетом введения экспертных оценок, должна свидетельствовать о напряженном эколого-хозяйственном состоянии территории. Следовательно, уже необхо-

дима разработка и принятие первоочередных природоохранных мер по регулированию ситуации.

Более того, в настоящее время территория междуречья рассматривается как перспективная для дальнейшего развития города. Активно ведется малоэтажное строительство жилых домов и коттеджных поселков. Администрацией города рассматривается план застройки, который включает в себя строительство дороги, объектов инженерной и социальной инфраструктуры [20]. В связи с увеличением количества автотранспорта у жителей города Томска увеличивается и доступность территории для рекреационных целей, следовательно, данный вид нагрузки тоже будет только возрастать. Потребление питьевой воды остается на высоком уровне. Воронка депрессии расстет на 9–12 м в год [21], и, соответственно, можно предположить, что площадь трансформированных земель из-за воздействия водозабора будет увеличиваться.

Таким образом, можно сделать вывод, что антропогенная нагрузка в районе исследования будет достаточно динамично расти, и без принятия спе-

циальных мер эколого-хозяйственный баланс территории изменится в негативном направлении.

Заключение

Проведенная оценка эколого-хозяйственного баланса Обь-Томского междуречья показал: состояние территории в настоящий момент в целом можно определить как умеренно преобразованное. В то же время результаты исследования указывают на рост экологической нестабильности, поскольку явно проявляется тенденция усиления негативных явлений – идет приращение земель, значительно подверженных антропогенному воздействию.

Очевидно, что при дальнейшем экстенсивном и неконтролируемом использовании природных ресурсов эколого-хозяйственный баланс будет ухудшаться, а естественная способность территории к саморегуляции может быть серьезно нарушена. В связи с этим необходима срочная разработка мер по снижению степени основных видов антропогенного воздействия и сохранению экологического баланса Обь-Томского междуречья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чибилёв А.А. Введение в геоэкологию (эколого-географические аспекты природопользования). – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 122 с.
2. Географические проблемы стратегии устойчивого развития природной среды и общества / сост.: Л.В. Салтыковская, И.Б. Савваитова. – М.: РАН, 1996. – 326 с.
3. Barrow C.J. Sustainable development: concept, value and practice // Third World Planning Review. – 1995. – № 17 (4). – P. 369–386.
4. Goodland R.I.A., Daly H.E., Kellenberg I. Imperatives for environmental sustainability // Population and Global Security: proceedings of the Foundation for Environmental Conservation. – Geneva, 1994. – P. 85–89.
5. Коптюг В.А. Избранные труды. Информатика. Экология. Устойчивое развитие. – М.: Наука, 2006. – Т. 4. – С. 504.
6. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. – Москва, Смоленск: Маджента, 2003. – 384 с.
7. Кочуров Б.И. Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территории. – Смоленск: СГУ, 1999. – 154 с.
8. Минников И.В., Куролап С.А. Оценка эколого-хозяйственного баланса территории Воронежской области // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. «География и геоэкология». – 2013. – № 1. – С. 129–136.
9. Бодрова В.Н. Расчет и оценка эколого-хозяйственного баланса Волгоградской области в геоинформационной системе // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 2 (март–апрель). – С. 43–50.
10. Меркулов П.И., Меркулова С.В., Варфоломеев А.Ф. Геоэкологические аспекты исследования структуры землепользования на территории Республики Мордовия // Вестник Мордовского университета. – 2008. – № 1. – С. 123–130.
11. Уленгов Р.А., Уразметов И.А. Некоторые подходы к геоэкологической оценке региональных геосистем Республики Татарстан // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – С. 140–147.
12. Миронова И.В. Эколого-хозяйственный баланс земель агроландшафтов Орловской области // Проблемы региональной экологии. – 2012. – № 2 (март–апрель). – С. 65–70.
13. Кочуров Б.И., Иванов Ю.Г. Оценка эколого-хозяйственного состояния территории административного района // География и природные ресурсы. – 1987. – № 4. – С. 49–54.
14. Лесохозяйственный регламент Тимирязевского лесничества Томской области. – 2014. URL: http://www.tomskles.ru/Dokumenty/Lesohozhajstvennyye_reglamenty/Reglamenty/ (дата обращения: 11.06.2015).
15. Состояние природной среды в зоне действия Томского водозабора / А.Г. Дюкарев, Н.Н. Пологова, В.В. Базанов, В.В. Лыгин, В.А. Свечников, Н.А. Чернова, Е.В. Горбов // Измерения, моделирование и информационные системы как средства снижения загрязнений на городском и региональном уровне: труды Международной конференции «ENVIROMIS». – Томск, 2002. – Т. 2. – С. 244–251.
16. Формирование и эксплуатация подземных вод Обь-Томского междуречья / В.К. Попов, В.А. Коробкин, Г.М. Рогов, О.Д. Лукашевич, Ю.Ю. Галямов, Б.И. Юргин, В.В. Золотарева. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета: Изд-во «Печатная мануфактура». – 2002. – 143 с.
17. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Водный режим почв в зоне влияния Томского водозабора // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – Вып. 324. – С. 363–372.
18. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Состояние природной среды в зоне действия Томского водозабора // Сибирский экологический журнал. – 2011. – № 1. – С. 123–134.
19. Global forest watch: interactive maps. URL: <http://www.global-forestwatch.org/> (дата обращения: 10.04.2015).
20. Схема территориального планирования Томского муниципального района Томской области. Положение о территориальном планировании. URL: <http://tomsk.gov.ru/ru/spravka-o-regione/goroda-i-rayony/tomskiy-rayon> (дата обращения: 15.03.2015).
21. Отчет МП «Водоканал» за 2009 год. – Томск, 2009. – 34 с.

Поступила 26.11.2015.

UDC 504: 504.05:574.4

ASSESSMENT OF ECOLOGICAL AND ECONOMICAL BALANCE OF THE TERRITORY OF OB-TOM INTERFLUVE CONSIDERING ANTHROPOGENIC LOAD

Ekaterina M. Panchenko,

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Academicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: pakatya@sibmail.com

Anatoliy G. Dyukarev,

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Academicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: DAG@imces.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to assess the territory between the rivers Ob and Tom for developing measures of the effective territory use to preserve the natural complex and non-confrontational economic and recreational activities.

The main aim of the study is to assess ecological and economic balance of the territory of Ob-Tom interfluvium.

The methods used in the study: the method of assessment of environmental and economic balance, taking into account the anthropogenic load. For research of a regional object's conditions – a choice as a basis the analysis of structure of lands is submitted to the most adequate. As the land use objectively reflects a current state of industrial, agricultural and recreational impact.

The results. The authors offered a classification for Ob-Tom interfluvium based on preliminary, expert estimates and the analysis of a current state of different types of land use in the studied territory. A number of specific types of anthropogenic influence were added to the categories which are traditionally used (for example, operation of underground sources of water supply). A comprehensive estimation of ecological and economic balance of the territory of Ob-Tom interfluvium was carried out in terms of the main categories of land use, taking into account various degrees of anthropogenic load. The authors analyzed the major negative factors of impact on different sites of the territory, calculated the coefficients of relative and absolute intensity of the territory. The authors also defined the coefficient of natural shielding of the territory and analyzed future tendencies of ecological and economic state changes. The calculations show that the condition of the territory of research at the moment in general can be defined as moderately transformed, but the tendency of strengthening of the negative phenomena is obviously shown – the number of lands under anthropogenic influence is growing.

Key words:

Ecological and economic balance, anthropogenic load, ecological estimation, indexes of relative and total tension, index of natural protectability, Ob and Tom interfluvium.

REFERENCES

1. Chibilev A.A. *Vvedenie v geoekologiyu (ekologo-geograficheskie aspekty prirodnopolzovaniya)* [Introduction in geoecology (ecological and geographical aspects of nature management)]. Yekaterinburg, UrO RAS Publ., 1998. 122 p.
2. *Geograficheskie problemy strategii ustoychivogo razvitiya prirodnoy sredy i obshchestva* [Geographic problems of strategy of stable development of natural environment and society]. Moscow, RAS Publ., 1996. 326 p.
3. Barrow C.J. Sustainable development: concept, value and practice. *Third World Planning Review*, 1995, no. 17 (4), pp. 369–386.
4. Goodland R.I.A., Daly H.E., Kellenberg I. Imperatives for environmental sustainability. *Proceedings of the Foundation for Environmental Conservation. Population and Global Security*. Geneva, 1994. pp. 85–89.
5. Koptyug V.A. *Izbrannye trudy. Informatika. Ekologiya. Ustoychivoe razvitiye* [Selected articles. Informatics. Ecology. Sustainable growth]. Moscow, Nauka Publ., 2006, vol. 4. 504 p.
6. Kochurov B.I. *Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitiye* [Ecological diagnostics and balanced development]. Moscow, Smolensk, Madzhenta Publ., 2003. 384 p.
7. Kochurov B.I. *Geoekologiya: ekodiagnostika i ekologo-khozyaystvennyy balans territorii* [Geo-ecology: ecological diagnostic and ecological and economic balance of the territory]. Smolensk, SGU Publ., 1999. 154 p.
8. Minnikov I.V., Kurolap S.A. Otsenka ekologo-khozyaystvennogo balansa territorii Voronezhskoy oblasti [Assessment of ecological and economic balance in the Voronezh oblast]. *Proceedings of Voronezh State University. Geography and Geoecology*, 2013, no. 1, pp. 129–136.
9. Bodrova V.N. Raschet i otsenka ekologo-khozyaystvennogo balansa Volgogradskoy oblasti v geoinformatsionnoy sisteme [Estimation and assessment of ecological and economic balance of the Volgograd region]. *Regional Environmental Issues*, 2013, no. 2 (March-April), pp. 43–50.
10. Merkulov P.I., Merkulova S.V., Varfolomeev A.F. Geoekologicheskie aspekty issledovaniya struktury zemlepolzovaniya na territorii Respubliki Mordoviya [Geo-ecological aspects of land use structure research on territory of the Republic of Mordovia]. *Mordovia University Bulletin*, 2008, no. 1, pp. 123–130.
11. Ulengov R.A., Urazmetov I.A. Nekotorye podkhody k geoekologicheskoy otsenke regionalnykh geosistem Respubliki Tatarstan [Some approaches to geo-ecological estimation of regional geosystems of the Republic of Tatarstan]. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 1, pp. 140–147.
12. Mironova I.V. Ekologo-khozyaystvennyy balans zemel agrolandshaftov Orlovskoy oblasti [Ecological and economic balance of agricultural landscapes of the Orel district]. *Regional Environmental Issues*, 2012, no. 2 (March-April), pp. 65–70.
13. Kochurov B.I., Ivanov Yu.G. Otsenka ekologo-khozyaystvennogo sostoyaniya territorii administrativnogo rayona [Estimation of ecological and economic state of administrative district territory]. *Geography and natural resources*, 1987, no. 4, pp. 49–54.
14. *Lesokhozyaystvennyy reglament Timiryazevskogo lesnichestva Tomskoy oblasti* [Forestry regulations of Timiryazev forestry of Tomsk region]. Available at: http://www.tomsles.ru/Dokumenty/Lesokhozyaystvennyye_reglamenty/Reglamenty/ (accessed 11 June 2015).
15. Dyukarev A.G., Pologova N.N., Bazanov V.V., Lgotin V.V., Svechnikov V.A., Chernova N.A., Gorbov E.V. Sostoyanie prirodnoy sredy v zone deystviya Tomskogo vodozabora [Environmental

- conditions in Tomsk diversion facility impact zone]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii «ENVIROMIS». Izmereniya, modelirovaniye i informatsionnye sistemy kak sredstva snizheniya zagryazneniy na gorodskom i regionalnom urovne* [Proc. of Int. Conf. ENVIROMIS. Environmental observations, modeling and information systems as tool for urban/regional pollution migration]. Tomsk, 2002, vol. 2. pp. 244–251.
16. Popov V.K., Korobkin V.A., Rogov G.M., Lukashevich O.D., Galyamov Yu.Yu., Yurgin B.I., Zolotareva V.V. *Formirovaniye i ekspluatatsiya podzemnykh vod Ob-Tomskogo mezhdurechya* [The formation and operation of groundwater Ob-Tom interfluves]. Tomsk, Publishing house of Tomsk State University of Architecture and Building, «Printing manufactory» Publ. house, 2002. 143 p.
 17. Dyukarev A.G., Pologova N.N. Vodnyy rezhim pochv v zone vliyaniya Tomskogo vodozabora [Soil water regime in zone of the Tomsk water intake]. *Tomsk State University Journal*, 2009, vol. 324, pp. 363–372.
 18. Dyukarev A.G., Pologova N.N. Sostoyaniye prirodnoy sredy v zone deystviya Tomskogo vodozabora [State of natural environment in the zone of the Tomsk water intake]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, no. 1, pp. 123–134.
 19. *Global forest watch: interactive maps*. Available at: <http://www.globalforestwatch.org/> (accessed 10 April 2015).
 20. *Skhema territorialnogo planirovaniya Tomskogo munitsipalnogo rayona Tomskoy oblasti. Polozheniye o territorialnom planirovanii* [The scheme of territorial planning of Tomsk municipal district of the Tomsk region. Regulations on spatial planning]. Available at: <http://tomsk.gov.ru/ru/spravka-o-regione/goroda-i-rayony/tomskiy-rayon> (accessed 15 March 2015).
 21. *Otchet MP «Vodokanal» za 2009 god* [Report of the MP «Vodokanal» for the year 2009]. Tomsk, 2009. 34 p.

Received: 26 November 2015.

УДК 517-4

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА ПО ЛИНЕЙНОМУ УЧАСТКУ ГАЗОПРОВОДА

Данилушкин Александр Иванович,

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения
промышленных предприятий электротехнического факультета Самарского
государственного технического университета, Россия, 443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244, гл. корпус. E-mail: aidanilushkin@mail.ru

Данилушкин Иван Александрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и управления
в технических системах факультета автоматики и информационных
технологий Самарского государственного технического университета,
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, гл. корпус.
E-mail: idanilushkin@mail.ru

Работа посвящена решению актуальной задачи повышения энергоэффективности процессов транспортировки газа.

Цель работы. Создание вычислительной модели процесса транспортировки газа, обладающей достаточной точностью и приемлемой вычислительной сложностью для решения задачи оптимального распределения нагрузки между оборудованием компрессорных цехов газопровода.

Методы исследования. Аналитическая модель процесса, изначально сформулированная в виде уравнения теплопроводности с учётом пространственного распределения температуры потока, с помощью методов структурной теории распределённых систем представлена в виде системы из распределённых передаточных функций. Задача рассматривается в одномерной постановке, взаимное влияние температурных полей потока и грунта описывается за счёт включения соответствующих слагаемых в правые части уравнений. Компьютерное моделирование и параметрическая идентификация полученной системы выполнены в пакете численного моделирования нелинейных динамических систем с сосредоточенными параметрами. Переход от распределённого представления к многосвязной сосредоточенной системе осуществлён за счёт аппроксимации распределённых сигналов по пространственной координате. Точность аппроксимации определяется количеством имеющихся точек контроля температуры по длине участка транспортировки газа. Идентификация системы проводилась по результатам пассивного эксперимента.

Результаты. Предложен подход к созданию компьютерной модели температуры газа на выходе линейного участка газопровода, учитывающий пространственную распределённость процесса теплоотдачи потока газа. В модели учтены изменяющаяся скорость потока, взаимное влияние температурных полей грунта и потока газа, влияние температуры воздуха. Приведён результат идентификации модели. Проведён анализ преимуществ и недостатков разработанной модели. Разработанная вычислительная модель процесса транспортировки газа по линейному участку обладает всеми необходимыми параметрами для использования её при оптимизации режимов работы оборудования компрессорных цехов газопровода.

Ключевые слова:

Газопровод, компрессорный цех, линейный участок, температурное поле, объект с распределёнными параметрами, поток, численно-аналитическая модель, идентификация.

Введение

Один из способов повышения энергоэффективности технологических процессов – выбор наиболее экономичного режима работы оборудования при заданных параметрах производительности [1]. Выбор режима осуществляется путём решения задачи оптимизации параметров технологических процессов с помощью компьютерного моделирования. Такой подход подразумевает создание достаточно точных моделей технологических процессов и поддержание их в актуальном состоянии при меняющихся со временем характеристиках оборудования. Для периодической актуализации моделей необходим постоянный сбор информации о ведении технологических процессов, что невозможно без внедрения современных систем автоматизированного управления [2, 3]. При этом современные автоматизированные системы должны разрабатываться с перспективой реализации на их основе интеллектуальных систем моделирования и оптимизации технологических процессов

[4–6]. Полная оснащённость процесса транспортировки газа системами автоматизированного управления позволяет использовать накапливаемую ими архивную информацию для проведения пассивной идентификации модели технологического процесса.

Разработка модели и метода её идентификации представляют собой отдельную задачу. Модель должна разрабатываться с учётом использования её в итерационных процессах поиска оптимума и обладать низкой вычислительной ресурсоёмкостью. Кроме того, процесс идентификации модели должен обеспечивать приемлемые результаты при имеющихся ограничениях по объёму и качеству экспериментально полученных данных о поведении реального объекта. В статье предлагается подход к построению модели, учитывающий, с одной стороны, пространственную протяжённость объекта исследования, а с другой – набор экспериментальных данных, полученных в фиксированных точках по длине линейного участка газопровода.

Выбор математического аппарата

Математическая модель транспортировки газа по трубопроводу должна учитывать пространственную протяжённость объекта моделирования. Давление газа, скорость потока и температура взаимосвязаны и меняются в процессе движения потока по газопроводу. В процессе транспортировки газ охлаждается, отдавая часть тепловой энергии грунту, в котором проложен газопровод. Процесс теплообмена между потоком газа и грунтом зависит от разности их температур и протекает с разной интенсивностью в разных точках по длине газопровода. На температуру грунта влияет температура наружного воздуха, значения которой меняются по длине газопровода. Зависимость математической модели не только от времени, но и от пространственной координаты позволяет учесть аппарат уравнений математической физики [7, 8].

В общем случае можно выделить три подхода к решению уравнений математической физики. Использование аналитических методов [7–10] позволяет получить решения с низкой вычислительной ёмкостью, но их применение ограничено каноническими формами тел и стационарными параметрами уравнений. Кроме того, поиск точного решения резко усложняется при описании объекта системой дифференциальных уравнений в частных производных.

Методы численного решения дифференциальных уравнений в частных производных и реализующие их компьютерные пакеты [11] позволяют получить решение с высокой точностью, обеспечивают учёт произвольной геометрии и нестационарных характеристик. Ряд современных работ посвящены численному моделированию тепло- и массопереноса при транспортировке газа [12, 13] и оценке точности моделей по реальным данным. Однако их использование в итерационных алгоритмах расчёта затруднительно из-за существенной вычислительной ресурсоёмкости. Кроме того, узким местом использования как аналитических, так и численных моделей является сложность определения физических характеристик взаимодействующих сред для конкретных условий.

В статье продемонстрированы возможности подхода, опирающегося на численно-аналитическое моделирование процесса теплообмена. Подход ранее был опробован при построении модели противоточного теплообменного аппарата [14], изначально описанного системой гиперболических уравнений. В работе [15] были сформулированы общие принципы использования численно-аналитического моделирования объектов и систем с распределёнными параметрами. Подход основывается на структурной теории распределённых систем [9, 10] и заключается в пространственной аппроксимации распределённых сигналов, описывающих взаимное влияние друг на друга отдельных объектов с распределёнными параметрами. В работе [16] предложено применение сплайн-интерполяции для перехода от пространственно-распределённых сигналов к набору сосредоточенных.

Численно-аналитическая модель теплообмена на линейном участке газопровода

Математическая модель процесса охлаждения газа основана на следующих допущениях [17]:

- 1) физические свойства газа и грунта неизменны;
- 2) скорость потока газа по всему сечению газопровода одинакова;
- 3) смешение газа в направлении движения потока незначительно и не учитывается;
- 4) смешение газа в направлении, перпендикулярном движению потока, полное;
- 5) стенка трубопровода принимается теплотехнически тонким телом и не учитывается при создании модели;
- 6) скорость теплопередачи в любой точке линейного участка газопровода пропорциональна разности температур потока и грунта.

В качестве аналитической модели температурного распределения газа по длине линейного участка газопровода используется уравнение теплового баланса для движущегося с переменной скоростью потока [9]:

$$\frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial t} + v(t) \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial x} = \beta_g (T_g(x, t) - \Theta(x, t)),$$

$$0 \leq x \leq x_1, \quad t > 0, \quad (1)$$

с начальными

$$\Theta(x, 0) = \Theta_0$$

и граничными условиями

$$\Theta(0, t) = \Theta_0(t), \quad \frac{\partial \Theta(\infty, t)}{\partial x} = 0.$$

Здесь $\Theta(x, t)$ – температура газа в точке x , в момент времени t ; $T_g(x, t)$ – температура грунта в точке x , в момент времени t ; $\Theta_0(t)$ – температура газа на входе линейного участка газопровода; $v(t)$ – скорость потока газа в газопровode, зависящая от времени t ; β_g – обобщённый коэффициент теплообмена между грунтом и потоком газа, учитывающий геометрию поверхности взаимодействия; x_1 – длина линейного участка газопровода.

Уравнение (1) не может быть решено аналитически, поскольку содержит произведение двух функций, зависящих от времени: $v(t) \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial x}$. Однако при небольших отклонениях функций, участвующих в произведении от некоторого среднего значения, можно выполнить линеаризацию уравнения (1) и затем получить решение для линеаризованного уравнения [18]. Для этого температура газа, $\Theta(x, t)$, грунта, $T_g(x, t)$, и скорость потока, $v(t)$, представляются в следующем виде:

$$\Theta(x, t) = \Theta_c(x) + \Delta \Theta(x, t),$$

$$v(t) = v_c + \Delta v(t),$$

$$T_g(x, t) = T_{gc} + \Delta T_g(x, t),$$

где $\Theta_c(x, t)$ – температурное распределение потока по длине газопровода в установившемся режиме при постоянной скорости потока v_c и температуре грунта, постоянной по всей длине T_{gc} ; $\Delta \Theta(x, t)$ – отклонение температурного распределения, вызван-

ное изменением скорости $\Delta v(t)$ и изменением температуры грунта $\Delta T_g(x,t)$. Линеаризованное уравнение (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \Theta(x,t)}{\partial t} + v_c \frac{\partial \Delta \Theta(x,t)}{\partial x} + \beta_g \Delta \Theta(x,t) = \\ = \beta_g (T_{gc} + \Delta T_g(x,t) - \Theta_c(x)) - \\ - v_c \frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x} - \Delta v(t) \frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2)$$

В установившемся режиме все отклонения будут равны нулю, и уравнение (2) упрощается до

$$v_c \frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x} + \beta_g \Theta_c(x) = \beta_g T_{gc},$$

решив которое можно будет получить выражение для температурного распределения потока $\Theta_c(x,t)$ в установившемся режиме:

$$\Theta_c(x) = T_{gc} (1 - \exp(-x\beta_g/v_c))$$

и, соответственно, для значения производной $\frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x}$, участвующей в уравнении (2):

$$\frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x} = \frac{1}{v_c} \beta_g T_{gc} \exp(-x\beta_g/v_c). \quad (3)$$

С учётом (3) уравнение (2) приводится к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta(x,t)}{\partial t} + v_c \frac{\partial \Theta(x,t)}{\partial x} + \beta_g \Theta(x,t) = \\ = \beta_g T_g(x,t) - \frac{\Delta v(t)}{v_c} T_{gc} \beta_g \exp(-x\beta_g/v_c). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение уравнения (4) возможно только при заданных выражениях для функций $T_g(x,t)$ и $\Delta v(t)$, входящих в его правую часть. В случае, когда вид функций заранее неизвестен, удобно перейти к анализу модели в изображениях по Лапласу. В этом случае решение уравнения (4) может быть найдено в виде [9, 10]

$$\Theta(x,p) = \int_0^{x_1} W(x,\xi,p) \cdot \omega(\xi,p) d\xi, \quad (5)$$

где передаточная функция $W(x,\xi,p)$ и стандартизирующая функция $\omega(x,p)$ имеют вид

$$W(x,\xi,p) = \mathbf{1}(x-\xi) \frac{1}{v_c} \exp\left(-\frac{p+\beta_g}{v_c}(x-\xi)\right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \omega(x,p) = \beta_g T_g(x,p) + v_c \delta(x) \Theta_0(p) - \\ - \frac{\Delta v(p)}{v_c} T_{gc} \beta_g \exp(-x\beta_g/v_c). \end{aligned} \quad (7)$$

Температура грунта $T_g(x,p)$ по длине газопровода определяется, с одной стороны, температурой газа в каждой точке x , с другой – температурой наружного воздуха $T_a(x,p)$. Влияние температуры грунта на температуру газа учтено в уравнении (1). Однако сама температура грунта также зависит от температуры газа и от температуры наружного воздуха. Эту зависимость в первом приближении можно выразить следующим образом:

$$T_{\bar{a}}(x,p) = W_1(p)T_a(x,p) + W_2(p)\Theta(x,p);$$

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \frac{k_1}{(T_1p+1)(\tau_1p+1)}; \\ W_2(p) &= \frac{k_2}{(T_2p+1)(\tau_2p+1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где k_1, k_2 – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния температуры воздуха и температуры газа на температуру грунта соответственно; T_1, τ_1, T_2, τ_2 – постоянные времени, определяющие динамику изменения температуры грунта при изменении соответствующих температур воздуха и газа.

Все коэффициенты, входящие в состав уравнения (8), могут быть получены с помощью параметрической идентификации аналитической модели на основе статистических данных о поведении температур в процессе эксплуатации линейного участка газопровода.

Измерение температуры наружного воздуха и газа осуществляется только на входе и выходе линейного участка газопровода, что не позволяет использовать выражение (8) для определения температуры грунта $T_g(x,p)$ в каждой точке участка газопровода. В работе принято, что температурное распределение грунта описывается кусочно-линейной зависимостью вида

$$T_g(x,p) = \begin{cases} T_g(0,p) + \\ + \frac{x}{L}(T_g(x_1,p) - T_g(0,p)), \text{ при } x < L; \\ T_g(x_1,p), \text{ при } x \geq L, \end{cases} \quad (9)$$

где L – расстояние от начала линейного участка газопровода, на котором происходит равномерное снижение температуры грунта от значения температуры грунта на входе, $T_g(0,p)$, до значения температуры грунта на выходе, $T_g(x_1,p)$. После точки $x=L$ температура грунта принимается равной температуре на выходе линейного участка. Параметр L подбирается в процессе параметрической идентификации модели.

Температура газа в любой точке линейного участка газопровода определяется выражением (5). Кусочно-линейная зависимость температурного распределения грунта от пространственной координаты (9) позволяет при вычислении интеграла (5) разбить его на два участка линеаризации: $[0,L]$ и $[L,x_1]$. Изменение температуры грунта на каждом из участков линеаризации описывается линейной зависимостью вида

$$T_g(x,p) = k(p)x + b(p), \quad (10)$$

а значит, искомая модель может быть представлена в виде последовательного соединения моделей двух участков. При этом температура газа на выходе первого участка является температурой газа на входе второго.

Температура газа на выходе участка с линейно изменяющейся температурой грунта $\Theta_{out}(p)$ определяется выражением

$$\Theta_{out}(p) = W_{in}(x_{out}, p)\Theta_{in}(p) + W_k(x_{out}, p)k(p) + W_b(x_{out}, p)b(p) + W_{\Delta v}(x_{out}, p)\Delta v(p), \quad (11)$$

где $\Theta_{in}(p)$ – температура газа на входе газопровода; $k(p)$ и $b(p)$ – коэффициенты, описывающие линейную зависимость температуры грунта от пространственной координаты; $\Delta v(p)$ – изменение скорости потока газа (рис. 1).

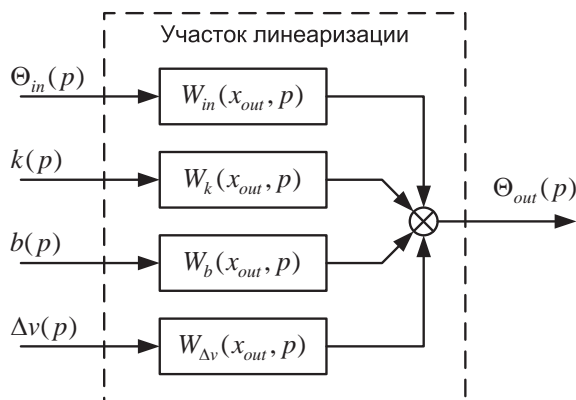


Рис. 1. Структурная схема модели участка линейаризации (УЛ)

Fig. 1. Block diagram of the linearization section (LS)

Передаточные функции, описывающие динамику поведения температуры газа на выходе $\Theta_{out}(p)$, в зависимости от изменения соответствующих входных параметров, определяются посредством вычисления интеграла (5) с подстановкой выражений (6), (7) и (10) и принимают вид

$$W_{in}(x_{out}, p) = \exp(-x_{out}(p + \beta_g)/v_c); \quad (12)$$

$$W_k(x_{out}, p) = \frac{\beta_g x}{p + \beta_g} - \frac{\beta_g v_c}{(p + \beta_g)^2} (1 - \exp(-x_{out}(p + \beta_g)/v_c)); \quad (13)$$

$$W_b(x_{out}, p) = \frac{\beta_g}{p + \beta_g} (1 - \exp(-x(p + \beta_g)/v_c)); \quad (14)$$

$$W_{\Delta v}(x_{out}, p) = -\frac{1}{v_c} \frac{T_{gc} \beta_g}{p} \exp(-x_{out} \beta_g / v_c) \times (1 - \exp(-x_{out} p / v_c)), \quad (15)$$

где x_{out} – длина участка с линейно изменяющейся температурой грунта.

Расчёт значения температуры газа на выходе линейного участка газопровода на базе полученной модели осуществляется следующим образом. В качестве исходных данных выступают графики поведения температуры наружного воздуха на входе и выходе линейного участка газопровода, температуры и скорости потока газа на входе линейного участка. Графики должны содержать значения параметров за несколько последних суток, до момента, в который производится расчёт. Тогда, задаваясь прогнозными (желаемыми) значениями пара-

метров в ближайшем будущем, можно получить прогноз изменения температуры на выходе линейного участка газопровода.

Идентификация численно-аналитической модели

Численно-аналитическая модель температуры газа может быть реализована в пакете компьютерного моделирования динамических систем, например в MATLAB/Simulink [19, 20]. Структура модели, учитывающая влияние температуры и расхода газа на входе и наружного воздуха на входе и выходе линейного участка, приведена на рис. 2. На вход модели поступают: температура газа на входе линейного участка газопровода $\Theta_0(p)$, температура наружного воздуха на входе и выходе линейного участка газопровода $T_{a0}(p)$, $T_{a1}(p)$, изменение скорости потока $\Delta v(p)$ относительно некоторого среднего значения v_c . В результате численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, определяющей выражениями передаточных функций, рассчитываются значения температуры грунта на входе и выходе линейного участка газопровода, $T_{g0}(p) \equiv T_{g0}(0, p)$ и $T_{g1}(p) \equiv T_{g1}(x_1, p)$, которые затем используются для вычисления коэффициентов линейаризации температурного распределения грунта согласно (9). Сигналы коэффициентов линейаризации поступают на входы блоков участков газопровода (УГ) (рис. 1), которые реализуют расчёт температуры газа на выходе блока, согласно выражению (11), по передаточным функциям (12)–(15). При этом первый блок УГ служит для вычисления температуры газа на выходе участка длиной L , а второй блок – для вычисления температуры на выходе моделируемого линейного участка газопровода, $\Theta_1(p) \equiv \Theta(x_1, p)$.

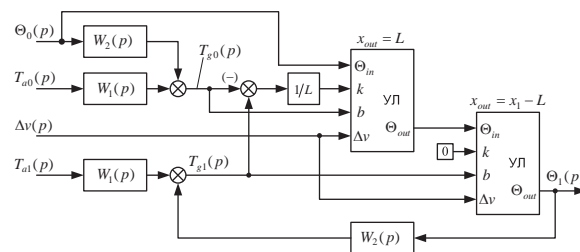


Рис. 2. Структурная схема модели линейного участка газопровода

Fig. 2. Block diagram of the model of gas-main pipeline section

В процессе параметрической идентификации модели осуществлялась настройка параметров передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$: k_1 , T_1 , τ_1 , k_2 , T_2 , τ_2 , значение параметра L и значение приведенного коэффициента теплообмена β_g . При этом в качестве неизменяемых настроек модели выступали: длина линейного участка газопровода, x_1 ; средняя скорость потока газа, v_c ; установившаяся (средняя) температура грунта T_{gc} .

Для оценки близости модели к реальному объекту использовался интеграл модуля рассогласования выхода объекта $\Theta_1^*(t)$ и модели $\Theta_1(t)$.

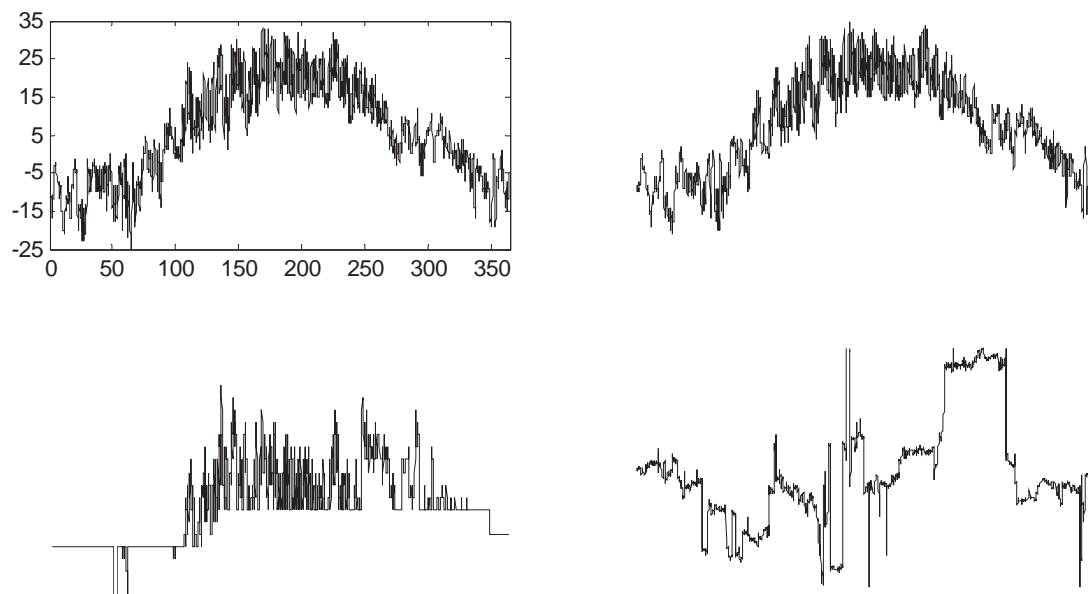


Рис. 3. Исходные данные для идентификации модели

Fig. 3. Original observations for the model identification

В качестве исходных данных для идентификации и валидации использовался годовой архив двухчасовых измерений параметров функционирования линейного участка газопровода. Первые 250 суток годового архива (68 % данных) использовались для проведения идентификации, оставшиеся 115 суток (32 % данных) – для валидации. Графики изменения параметров представлены на рис. 3, 4.

Относительное изменение скорости потока (рис. 3) рассчитывалось как отношение мгновенной скорости к среднегодовой. Скорость потока вычислялась для каждого временного среза с учётом физических характеристик газа, его объёмного расхода, давления и температуры.

На рис. 4 представлен график изменения температуры газа на выходе линейного участка газопровода, а также результат параметрической идентификации разработанной модели.

В результате проведения параметрической идентификации для линейного участка длиной $x_1=110$ км при средней скорости потока $v_c=739$ км/сут. и средней температуре грунта $T_{gc}=10$ °С были получены следующие значения идентифицируемых параметров: $k_1=0,345$, $k_2=0,269$, $T_1=12,2$ сут., $\tau_1=5,7$ сут., $T_2=9,5$ сут., $\tau_2=5,1$ сут., $L=15$ км, $\beta_g=4,11$ сут.⁻¹.

Среднеинтегральное отклонение модуля температуры на выходе модели составляет $0,95^\circ$ на всём диапазоне имеющихся экспериментальных данных. При этом на участке валидации модели среднеинтегральное отклонение модуля температуры составляет $0,6^\circ$. Полученные результаты сопоставимы с результатами моделирования параметров газового потока с помощью численного решения

системы дифференциальных уравнений в виде системы конечно-разностных уравнений в работе [12], где среднеарифметическое отклонение модели от экспериментальных данных составляет $1,57^\circ$ на всём диапазоне.

При решении задачи оптимизации параметров процесса транспортировки газа модель должна обеспечивать точность $\pm 1^\circ$ в статике и до $\pm 3^\circ$ в динамических режимах.

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы.

1. В летний период часто наблюдается ситуация, когда мощности установки охлаждения газа недостаточно для поддержания заданной температуры на входе линейного участка газопровода. Тем не менее, несмотря на значительные отклонения температуры газа на входе линейного участка от заданного значения, температура на выходе остаётся практически постоянной. Это означает, что газ остывает в процессе транспортировки по газопроводу.
2. Разработанная модель обеспечивает достаточное качество прогнозирования поведения температуры газа на выходе линейного участка газопровода в летний, осенний и зимний периоды. Однако в период с середины марта по начало июня результаты моделирования существенно расходятся с реальными данными. Данный период совпадает с периодом таяния снега, повышения влажности земли, что приводит к увеличению теплопроводности грунта и лучшему отводу тепла от газопровода (рис. 4, интервал с 75 по 160 сутки). Для повышения точности модели потребуется ввести зависимость обобщённого коэффициента теплообмена β_g от времени года.



Рис. 4. Температура газа на выходе линейного участка газопровода (сплошная линия) и на выходе модели (пунктир)

Fig. 4. Gas temperature at the outlet of the gas-main pipeline section (solid line) and at the output of the model (dotted line)

Заключение

Предложенная модель может использоваться для изучения влияния режимов работы компрессорной станции, расположенной на входе линейного участка газопровода, на режим работы следующей по ходу магистрали компрессорной станции.

Планируется её применение при оптимизации режимов работы установки охлаждения газа компрессорной станции на входе газопровода и при решении задач оптимального распределения нагрузки между группой последовательно соединённых компрессорных станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yanvarev I.A., Vanyashov A.D., Krupnikov A.V. Thermal management technologies development for the gas transport on the gas-main pipeline // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 113. – P. 237–243.
2. Автоматизация диспетчерского управления в газодобывающей компании / С.А. Богдан, А.В. Кудинов, Н.Г. Марков, С.С. Родикевич // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 5. – С. 29–35.
3. Energy-saving technologies in transportation of natural gas facilities / T. Datsuk, G. Pozin, V. Ulyasheva, M. Kanev // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 117. – P. 237–243.
4. Интеллектуализация нефтеперерабатывающих процессов с использованием компьютерных моделирующих систем / Е.Н. Ивашкина, И.М. Долганов, Э.Д. Иванчина, М.В. Киргина, С.А. Фалеев, А.В. Кравцов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 80–86.
5. Системы технологического моделирования для мониторинга и оптимизации нефтеперерабатывающих производств / Е.М. Юрьев, Е.Н. Ивашкина, Э.Д. Иванчина, А.В. Кравцов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 126–132.
6. Информационно-моделирующая система процессов промышленной подготовки газа и газового конденсата / А.В. Кравцов, Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко, В.И. Рейзлин, А.А. Гавриков // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 132–137.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
8. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 720 с.
9. Бутковский А.Г. Структурная теория распределённых систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
10. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
11. Дудников Е.Е. Универсальные программные пакеты для моделирования систем с распределёнными параметрами // *Автоматика и телемеханика*. – 2009. – № 1. – С. 3–24.
12. Helgaker J.F., Ytrehus T. Coupling between continuity/momentum and energy equation in 1D gas flow // *Energy Procedia*. – 2012. – № 26. – P. 82–89.
13. Oosterkamp A., Helgaker J.F., Ytrehus T. Modelling of natural gas pipe flow with rapid transients-case study of effect of ambient model // *Energy Procedia*. – 2015. – № 64. – P. 101–110.
14. Гусева М.А., Данилушкин И.А. Применение пространственной аппроксимации распределённых сигналов при моделировании теплообменных аппаратов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. – 2010. – Вып. 7 (28). – С. 151–157.
15. Данилушкин И.А., Гусева М.А. Численно-аналитическое моделирование систем с распределёнными параметрами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2012. – № 8 (137). – С. 48–52.
16. Данилушкин И.А. Применение сплайн-интерполяции пространственного распределения в численно-аналитических моделях теплообмена // *Информационные, измерительные и*

- управляющие системы (ИИУС-2012): матер. III Междунар. науч.-техн. конф. 29–31 мая 2012 г. / Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2012. – С. 13–16.
17. Девятков Б.Н., Демиденко Н.Д. Теория и методы анализа управляемых распределенных процессов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 272 с.
 18. Данилушкин А.И., Рапопорт Э.Я. Алгоритмы функционирования процесса непрерывно-последовательного индукционного нагрева // Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок: межвузовский сборник научных трудов. Вып. VII. – Куйбышев: КИТИ, 1976. – С. 118–124.
 19. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
 20. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.

Поступила: 16.11.2015.

UDC 517-4

NUMERICAL ANALYTICAL MODEL OF GAS TRANSPORT ON THE GAS-MAIN PIPELINE

Aleksandr I. Danilushkin,

Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russia. E-mail: aidanilushkin@mail.ru

Ivan A. Danilushkin,

Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russia. E-mail: idanilushkin@mail.ru

The paper is devoted to solving an urgent problem of increasing energy efficiency of gas transportation.

The main aim of the study is to create a computational model of gas transport with adequate accuracy and reasonable computational complexity for solving the problem of optimal load distribution between the equipment of compressor stations of the gas-main pipeline.

The methods used in the study. The analytical model of the process, which was originally formulated as the heat equation taking into account the spatial distribution of the flow temperature, is presented in the form of distributed system transfer functions using the methods of structural theory of distributed systems. The problem is considered in one-dimensional formulation, the mutual influence of temperature fields of flow and soil is described by including the corresponding components in the right sides of the equations. Computer modeling and parametric identification of the system are made with the software for numerical simulation of nonlinear dynamic systems with lumped parameters. The transition from a distributed representation to multicoupling system is realized due to an approximation of the distributed signals along the spatial axis. Accuracy of the approximation depends on the quantity of temperature measuring points along the length of the gas-main pipeline. The identification of the system is based on the results of the passive experiment. The results. The authors introduced an approach to the development of a computer model of the gas temperature at the outlet of the gas-main pipeline that takes into account the spatial distributed process of the gas flow heat loss. The model takes into account the flow rate change, the mutual influence of temperature fields of the soil and the gas flow, the influence of the air temperature. The results of the identification of the model are given. The analysis of the advantages and disadvantages of the developed model is made. Developed computational model of gas transport on the gas-main pipeline has all the necessary parameters for its using for optimizing operating modes of equipment of the gas-main pipeline compressor stations.

Key words: Gas pipeline, compressor station, gas-main pipeline, temperature field, object with distributed parameters, flow, numerical analytical model, identification.

REFERENCES

1. Yanvarev I.A., Vanyashov A.D., Krupnikov A.V. Thermal management technologies development for the gas transport on the gas-main pipeline. *Procedia Engineering*, 2015, no. 113, pp. 237–243.
2. Bogdan S.A., Kudinov A.V., Markov N.G., Rodikevich S.S. Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v gazodobyvayushchey kompanii [Automation of dispatching control of gas company]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 5, pp. 29–35.
3. Datsuk T., Pozin G., Ulyasheva V., Kanev M. Energy-saving technologies in transportation of natural gas facilities. *Procedia Engineering*, 2015, no. 117, pp. 237–243.
4. Ivashkina E.N., Dolganov I.M., Ivanchina E.D., Kirgina M.V., Faleev S.A., Kravtsov A.V. Intellektualizatsiya neftepererabatyvayushchikh protsessov s ispolzovaniem kompyuternykh modeliruyushchikh sistem [Intellectualization of oil-refining processes using computer modeling systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 5, pp. 80–86.
5. Yurev E.M., Ivashkina E.N., Ivanchina E.D., Kravtsov A.V. Sistemy tekhnologicheskogo modelirovaniya dlya monitoringa i optimizatsii neftepererabatyvayushchikh proizvodstv [Systems of technologic simulation for monitoring and optimization of oil refineries productions]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 126–132.
6. Kravtsov A.V., Usheva N.V., Moyzes O.E., Kuzmenko E.A., Reylin V.I., Gavrikov A.A. Informatsionno-modeliruyushchaya sistema protsessov promyslovoy podgotovki gaza i gazovogo kondensata [The information-modeling system of processes of commercial gas and gas condensate]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 132–137.
7. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [The theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p.

8. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Uraveneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Partial differential equations of mathematical physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 720 p.
9. Butkovskiy A.G. *Strukturnaya teoriya raspredelennykh sistem* [Structural theory of distributed systems]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 320 p.
10. Rapoport E.Ya. *Strukturnoe modelirovaniye obektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami* [Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 299 p.
11. Dudnikov E.E. *Universalnye programmnye pakety dlya modelirovaniya sistem s raspredelennymi parametrami* [Universal software packages to model the distributed parameter systems]. *Automation and Remote Control*, 2009, no. 1, pp. 1–19.
12. Helgaker J.F., Ytrehus T. *Coupling between continuity/momentum and energy equation in 1D gas flow*. *Energy Procedia*, 2012, no. 26, pp. 82–89.
13. Oosterkamp A., Helgaker J.F., Ytrehus T. *Modelling of natural gas pipe flow with rapid transients-case study of effect of ambient model*. *Energy Procedia*, 2015, no. 64, pp. 101–110.
14. Guseva M.A., Danilushkin I.A. *Primeneniye prostranstvennoy approksimatsii raspredelennykh signalov pri modelirovanii teploobmennyykh apparatov* [Application of spatial approximation of the distributed signals for modeling of heat exchangers]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»*, 2010, iss. 7 (28), pp. 151–157.
15. Danilushkin I.A., Guseva M.A. *Chislenno-analiticheskoye modelirovaniye sistem s raspredelennymi parametrami* [Numerical analytical modeling systems with distributed parameters]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2012, no. 8 (137), pp. 48–52.
16. Danilushkin I.A. *Primeneniye splayn-interpolyatsii prostranstvennogo raspredeleniya v chislenno-analiticheskikh modelyakh teploobmena* [Application of spline interpolation of the spatial distribution in numerical and analytical models of heat transfer]. *Mater. III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Informatsionnye, izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy (IIUS-2012)»* [Proc. III Int. scientific conf. Systems of information, measuring and control]. Samara, 2012. pp. 13–16.
17. Devyatov B.N., Demidenko N.D. *Teoriya i metody analiza upravlyaemykh raspredelennykh protsessov* [Theory and methods of analysis of controlled distributed processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 272 p.
18. Danilushkin A.I., Rapoport E.Ya. *Algoritmy funktsionirovaniya protsessov nepreryvno-posledovatel'nogo induktsionnogo nagreva* [Algorithms of functioning of process of continuously-sequential induction heating]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Algoritmizatsiya i avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i promyshlennykh ustanovok»* [Interuniversity collection of scientific papers. Algorithmization and automation of technological processes and industrial plants]. Iss. VII. Kuybyshev, 1976. pp. 118–124.
19. Chernykh I.V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SITILINK: software for creation of engineering applications]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003. 496 p.
20. Dyakonov V.P. *Simulink 5/6/7: samouchitel* [Simulink 5/6/7: teach-yourself book]. Moscow, DMK-Press, 2008. 784 p.

Received: 16 November 2015.

УДК 551.345:528.88

ЗОНЫ АКТИВНОГО ТЕРМОКАРСТА НА ТЕРРИТОРИИ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ И ИХ ВЫЯВЛЕНИЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Полищук Юрий Михайлович,

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151; главный научный сотрудник научно-исследовательского информационного центра ФГБУН «Институт химии нефти СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Богданов Александр Николаевич,

главный специалист Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151. E-mail: bogdanovan@uriiit.ru

Актуальность работы обусловлена отсутствием методологии выявления и картографирования зон активных термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты на основе космических снимков с использованием геоинформационных технологий и необходимостью ее разработки применительно к оценке накопления метана в термокарстовых озерах, являющихся наиболее активными источниками эмиссии метана в атмосферу в арктических и субарктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий.

Цель работы: разработка методических вопросов выявления областей распространения термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты и картографического отображения их границ на основе данных дистанционного зондирования и средств геоинформационных систем.

Методы исследования: дистанционные методы исследования пространственной структуры полей термокарстовых озер, включая малоизученные озера небольших размеров, с использованием спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения; методы геоинформационных систем для пространственного и статистического анализа спутниковых изображений полей термокарстовых озер в мерзлотных ландшафтах озерно-термокарстовых равнин.

Результаты. Разработаны методические вопросы и описана процедура выявления зон активного термокарста как областей распространения термокарстовых озер в мерзлотных ландшафтах и определения границ этих зон по космическим снимкам Landsat-8 с использованием снимков высокого разрешения Канопус-В. Сформированы коллекции снимков Landsat-8 и Канопус-В, полученных в летние месяцы 2013–2014 гг. На основе разработанной методологии с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 определены границы и построена карта зон активного термокарста на территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири.

Ключевые слова:

Многолетняя мерзлота, глобальное потепление, термокарстовые озера, геоинформационные системы, спутниковые снимки.

Введение

Глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в последние десятилетия в северных широтах планеты, ускоряет деградацию многолетней мерзлоты. Это вызывает увеличение глубины сезонного протаивания почвы, что сопровождается снижением прочности многолетнемерзлых грунтов и нарушением объектов инфраструктуры. Более того, мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах на северных территориях Евразии и Северной Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1]. Углекислый газ и метан являются одними из наиболее сильных парниковых газов. Принято считать, что углекислый газ обеспечивает более половины вклада в парниковый эффект. Особую тревогу вызывает возможный рост эмиссии

метана под влиянием климатических изменений, который, по данным [2], несмотря на значительно меньшую концентрацию в атмосфере, по величине прямого потенциала глобального потепления многократно превышает углекислый газ.

В качестве основных природных источников эмиссии метана на северных территориях рассматриваются болота и переувлажненные ландшафты, озерно-термокарстовые равнины, подводные метангидраты шельфовых морей и крупных водоемов в зоне многолетней мерзлоты и др. [3–6]. Согласно [7, 8], наиболее активным источником эмиссии метана в зоне мерзлоты Западной Сибири являются малые термокарстовые озера с площадью менее 0,05–0,1 га, что объясняется активной термокарстовой эрозией берегов при повышении температуры [5]. Из-за своих малых размеров такие озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках вклада метана в общий парниковый эффект.

В этих условиях получение обоснованных прогнозных оценок изменения вклада метана из малых озер в зоне вечной мерзлоты под действием климатических изменений является важной задачей, решение которой, согласно [9], предполагает использование экспериментальных данных об изменении численности и площадей озер. Получение таких данных для территории Западной Сибири без применения методов дистанционного зондирования поверхности Земли невозможно ввиду ее труднодоступности из-за высокой степени заболоченности.

В последнее время проведены многочисленные дистанционные исследования изменений термокарстовых озер в Сибири, на Аляске и в других северных регионах [6, 10–15]. В большинстве этих исследований использовались космические снимки среднего разрешения (30 м) Landsat, обеспечивающие многократное полное покрытие земного шара. Но на этих снимках малые озера не обнаруживаются. Поэтому необходимо использовать снимки высокого (1–10 м) и сверхвысокого (менее 1 м) разрешения. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата территории обеспечивают сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, что затрудняет выбор ключевых (тестовых) участков для проведения дистанционных исследований, направленных на изучение изменений термокарстовых озер в условиях отмечаемой в [16] значительной неравномерности их пространственного распределения по территории многолетней мерзлоты. Поэтому актуальным является выявление на исследуемой территории зон наиболее активного развития термокарстовых процессов, в пределах границ которых могут быть выбраны тестовые участки для проведения исследований.

Под зоной активного термокарста (АТ) понимается область распространения термокарстовых озер различных размеров и возраста с многочисленными очагами развития термокарста в мерзлотных ландшафтах озерно-термокарстовых равнин [17]. Именно с этими зонами связаны большие геоэкологические риски [18] для территорий в зоне многолетней мерзлоты. В этих зонах наибольшую изменчивость проявляют озера малых размеров, которые в большом количестве возникают в условиях глобального потепления климата. Действительно, как показано в [14], численность вновь образующихся малых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири в последние три-четыре десятилетия почти в 20 раз превышает число исчезающих озер.

Однако методические вопросы определения зон активного термокарста в мерзлотных ландшафтах на основе использования спутниковых снимков не разработаны, что не позволяет создать геоинформационную технологию построения зон активного термокарста. В связи с изложенным целью настоящей работы явилась разработка методических вопросов выявления и картографирования зон активного термокарста на территориях многолетней мерзлоты на основе космических снимков.

Данные и объекты исследования

Исследования проводились на территории Западной Сибири, в зоне прерывистого распространения многолетней мерзлоты. Расположение этой зоны показано на рис. 1, где представлен фрагмент картосхемы геокриологического зонирования Западной Сибири.

В наших исследованиях, направленных на построение зон активного термокарста (АТ), использованы космические снимки Landsat-8 и Канопус-В. При составлении мозаики снимков для территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири использовано 34 снимка Landsat-8, принятых в теплые месяцы 2013–2014 гг., 80 % из которых получены в июле-августе, когда на поверхности озер уже нет ледового покрова, затрудняющего автоматическое дешифрирование снимков. Для исследования погрешности определения границ зон активного термокарста, выявляемых на основе мозаики снимков Landsat-8, использованы 7 снимков высокого разрешения Канопус-В. Снимки Канопус-В для территории прерывистой криолитозоны получены за сравнительно короткий интервал времени (с 23 июня по 22 июля), т. е. приблизительно в те же теплые периоды 2013–2014 гг., что и снимки Landsat-8. Даты съемки Канопус-В на разных тестовых участках исследуемой территории в зоне прерывистой мерзлоты (рис. 1) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика тестовых участков и даты съемки снимков Канопус-В

Table 1. Characteristic of test sites and date of Canopus-V recording images

№ ТУ TS No	Широта, град. Latitude, deg.	Долгота, град. Longitude, deg.	Дата Date	Площадь ТУ, км ² TS area, km ²
1	65,70	67,30	30.06.2014	400
2	64,86	69,34	20.06.2014	380
3	66,25	72,45	22.07.2013	600
4	64,82	74,02	03.08.2014	300
5	65,82	77,02	23.06.2013	770
6	65,65	79,89	05.07.2013	480
7	65,15	82,36	18.07.2013	440

Выбор тестовых участков (ТУ) для проведения исследований производился в границах сцен космических снимков Канопус-В в местах активного термокарста [18], определяемых по наибольшему сгущению озер. Общая характеристика выбранных тестовых участков дана в табл. 1. Как видно на рис. 1, выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований в зоне прерывистого распространения мерзлоты. Согласно [18], образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. Поэтому большинство исследователей озерных термокарстовых равнин исходят из предположения о том, что в ра-

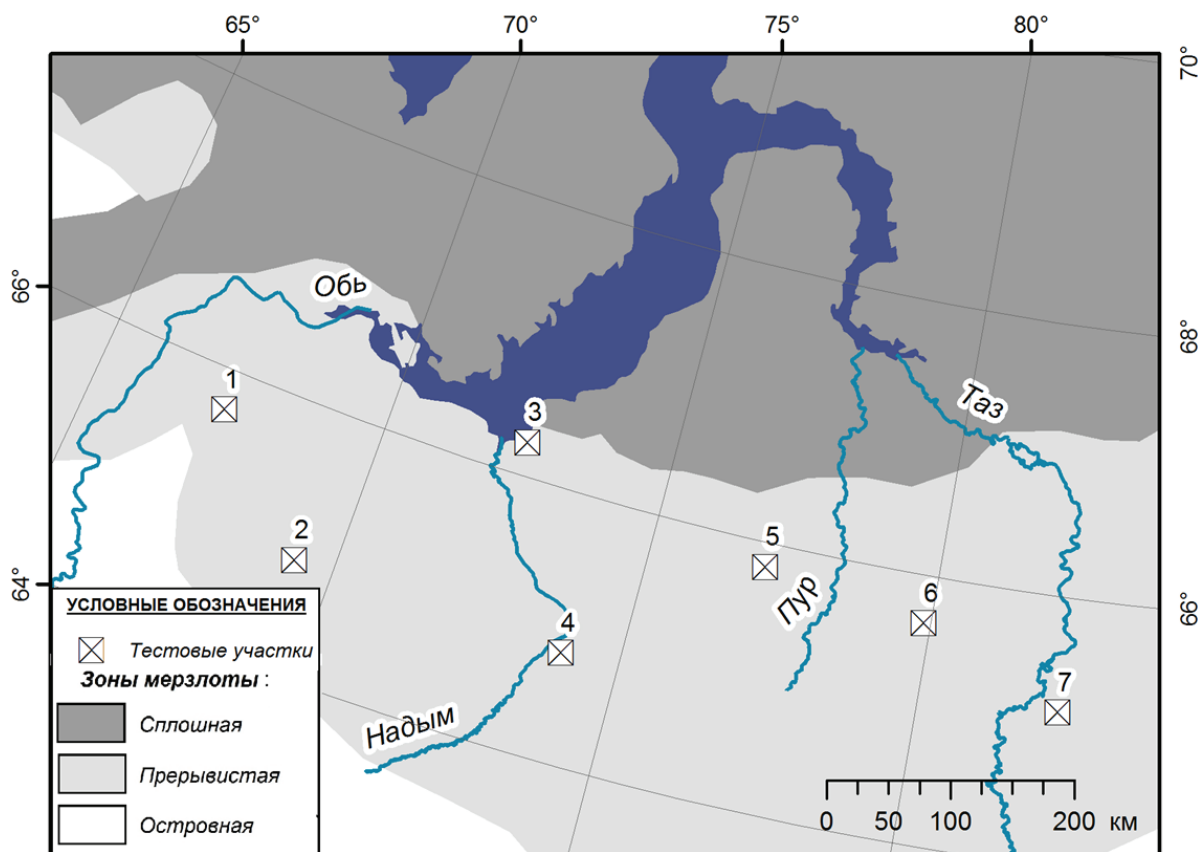


Рис. 1. Картограмма геокриологического зонирования территории многолетней мерзлоты Западной Сибири с обозначенным расположением тестовых участков на снимках Канапус-В

Fig. 1. Schematic map of geocryological zoning of permafrost territory of Western Siberia with designated location of test sites in Kanopus-V images

йонах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород криолитозоны распространены преимущественно озера термокарстового происхождения либо озера смешанного генезиса при значительном влиянии термокарстовых процессов. Так, в работах В.И. Кравцовой с соавторами [6, 19] на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Поэтому в настоящей работе исследуемые озера рассматриваются как термокарстовые озера.

Обработка космических снимков проведена с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3. На каждом из тестовых участков определялось от нескольких сотен до десятков тысяч термокарстовых озер сравнительно небольших размеров. Для обеспечения приемлемой погрешности в определении площадей озер минимальный размер регистрируемых озер определялся как полигон, в границах которого располагаются 10 пикселей. При разрешении снимка Канапус-В, равном 2 м, площадь пикселя составляет 4 м². Определяя наименьшее по размеру озеро как полигон размером 10 пикселей, получим минимальную площадь озера 40 м². В связи с

этим при формировании массивов данных со снимков Канапус-В для последующего анализа исключались озера с размерами менее 40 м².

Методические вопросы выявления зон активного термокарста

Общая схема процедуры определения границ зон активного термокарста. Определение границ зон АТ проводилось по снимкам Landsat-8, а снимки высокого разрешения Канапус-В использовались для уточнения границ этих зон на основе исследования погрешностей определения границ. Общая схема процедуры построения зон АТ дана на рис. 2.

Границы зон активного термокарста были определены как контуры, ограничивающие пространственные ассоциации (совокупности) озер, полученные путем объединения (агрегирования) близко расположенных друг к другу озер на снимках Landsat-8 (рис. 3). Эта процедура выполнялась с использованием инструмента пространственного анализа Aggregate Polygons в составе программного комплекса ArcGIS 10.3 [20].

На рис. 4 дана иллюстрация построения зоны АТ с использованием указанного инструмента. На фрагменте снимка Канапус-В показан результат

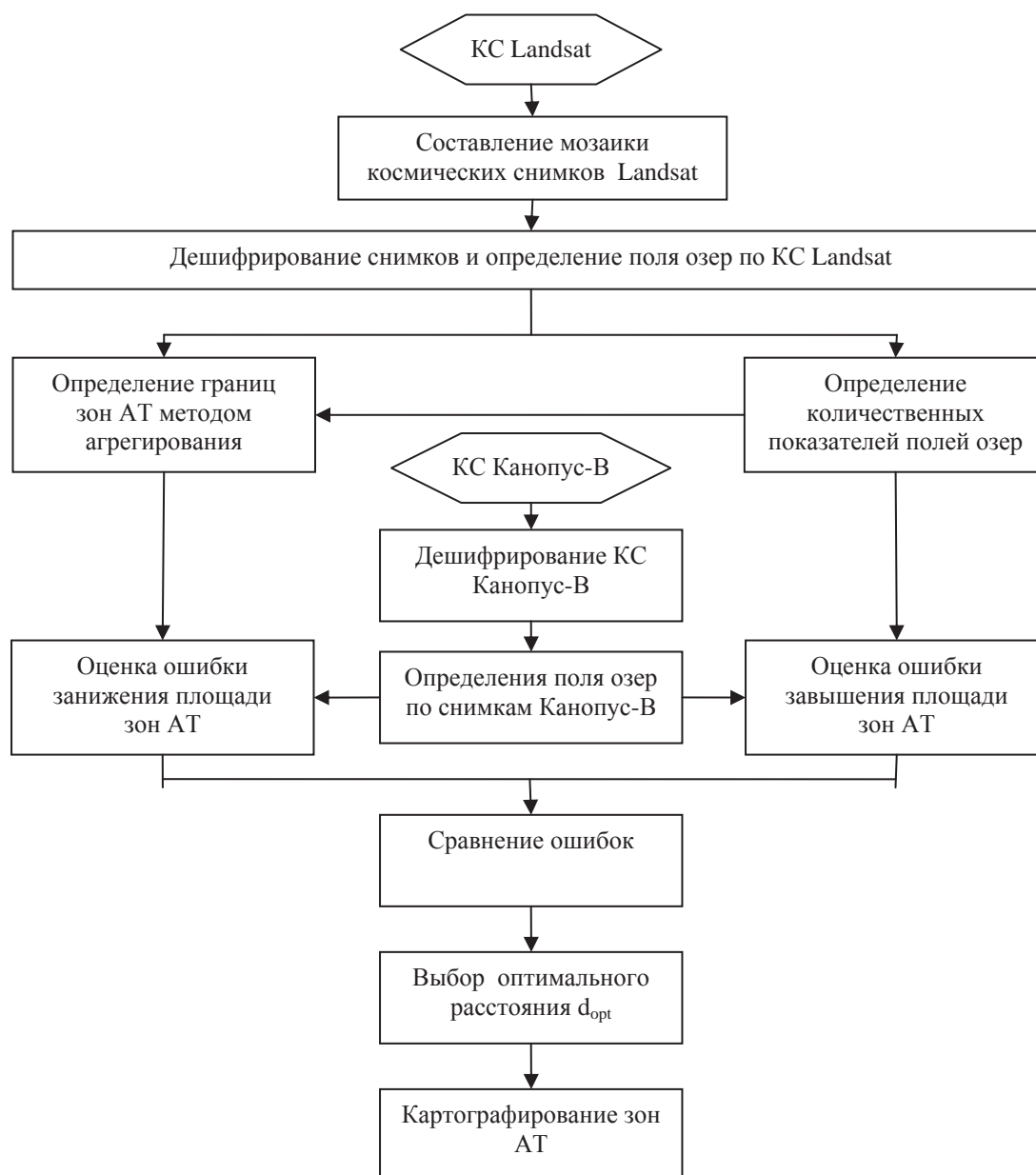


Рис. 2. Процедура определения и картографирования зон активного термокарста на основе космических снимков

Fig. 2. Procedure for identifying and mapping zones of active thermokarst based on satellite images

определения границ зон АТ, а сами зоны выделены сиреневым цветом.

Такой подход к определению зон АТ предполагает, что кроме термокарстовых озер сравнительно больших размеров, хорошо обнаруживаемых по космоснимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м), на исследуемой территории также будут реально присутствовать и малые озера (с размерами менее 0,2–0,3 га), не различимые на снимках среднего разрешения Landsat, но которые будут хорошо видны на снимках высокого разрешения Канопус-В. Поэтому при автоматическом определении границ зон АТ по снимкам среднего разрешения будут возникать ошибки двух видов:

1. Занижение общей площади реальных зон активного термокарста из-за выбора слишком малого расстояния между озерами d показано на рис. 3. При этом риск занижения площади зоны АТ будет возникать в случаях, когда в зону АТ не будут включены малые озера, расположенные в удалении от крупных, т. е. оказавшиеся за пределами автоматически формируемых границ зоны АТ.
2. Завышение общей площади реальных зон активного термокарста из-за выбора слишком большого расстояния d при объединении крупных озер. Риск завышения площади зоны АТ будет возникать в случаях, если в зону активно-

го термокарста будут включены те участки территории, на которых отсутствуют озера (как проявления термокарста), т. е. на которых, по данным космосъемки более высокого пространственного разрешения, не обнаруживаются озера меньших размеров.

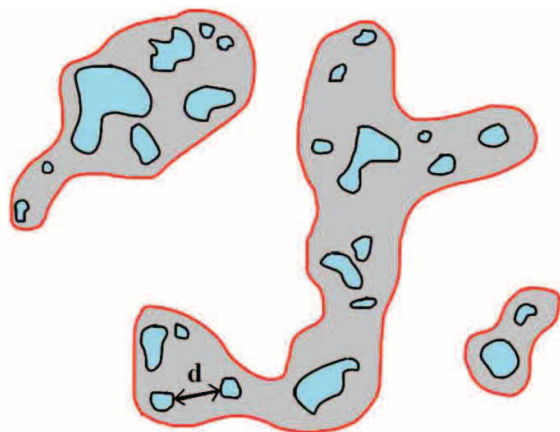


Рис. 3. Формирование границ зон активного термокарста методом агрегирования озер

Fig. 3. Formation of the active thermokarst zones boundaries by aggregating lakes

На рис. 5 представлен фрагмент снимка Канопус-В, на котором пятнами черного цвета показаны озера. Здесь отображены зоны АТ (выделены сиреневым цветом) и показаны штриховкой области завышения и занижения площади зон АТ. Каждому понятно, что размеры этих областей занижения и завышения, т. е. ошибки занижения и завышения площади зон АТ, зависят от расстояния между озерами d . При малых величинах этого расстояния возрастает ошибка занижения площади зон АТ, а ошибка завышения будет невелика. И наоборот, при увеличении расстояния d растет риск (ошибка) завышения, а ошибка занижения площади снижается. В связи с этим возникает

важнейший вопрос: как найти величину расстояния d , при которой риски занижения и завышения площадей зон АТ при автоматизированном определении границ этих зон с помощью инструмента Aggregate polygons будут иметь приемлемые (минимальные) величины? Далее будем называть такую величину расстояния оптимальной и обозначим ее d_{opt} .

Нахождение оптимальной величины расстояния d_{opt} в общем случае представляет собой задачу оптимизации, которая в связи с отсутствием аналитического вида зависимостей рассматриваемых ошибок от расстояния d не может быть решена. Приближенное решение этой задачи возможно с использованием имитационного эксперимента, суть которого сводится к вычислению ошибок завышения и занижения площадей зон АТ по реальным спутниковым снимкам в зависимости от расстояния d и определению величины d_{opt} на основе анализа результатов эксперимента.

Эксперимент проводился с использованием снимков Landsat-8 и Канопус-В на семи тестовых участках в зоне прерывистого распространения мерзлоты Западной Сибири. Расположение этих участков представлено на рис 1, который демонстрирует достаточно равномерное распределение этих ТУ на исследуемой территории. На каждом из ТУ по снимкам Landsat с помощью инструмента Aggregate polygons определялись зоны АТ для 5 различных значений расстояния d . По снимкам Канопус-В на каждом ТУ создавались карты полей озер, на основе совмещения которых с контурами зон АТ, построенных по снимкам Landsat-8, были рассчитаны ошибки занижения и завышения суммарной площади зон АТ при разных величинах d . Приведем ниже описание процедур оценивания указанных ошибок занижения и завышения площадей.

Оценка ошибки занижения площади зон. Занижение истинной площади активного термокарста будет тем больше, чем меньшая величина d была выбрана при определении границ зон АТ. Ошиб-

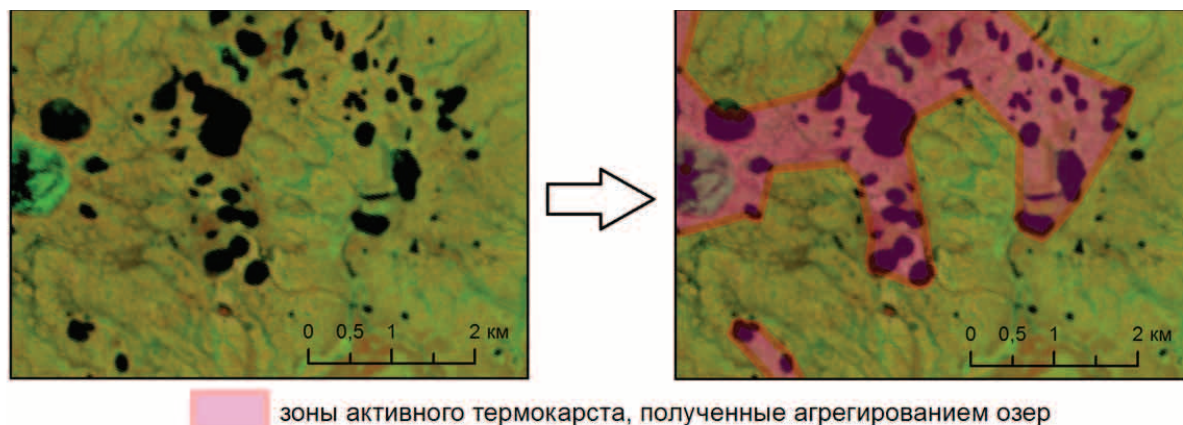


Рис. 4. Фрагмент космического снимка Канопус-В (слева) и отображение на нем зон активного термокарста (справа)

Fig. 4. Fragment of Canopus-B satellite image (on the left) and display of the zones of active thermokarst (on the right)

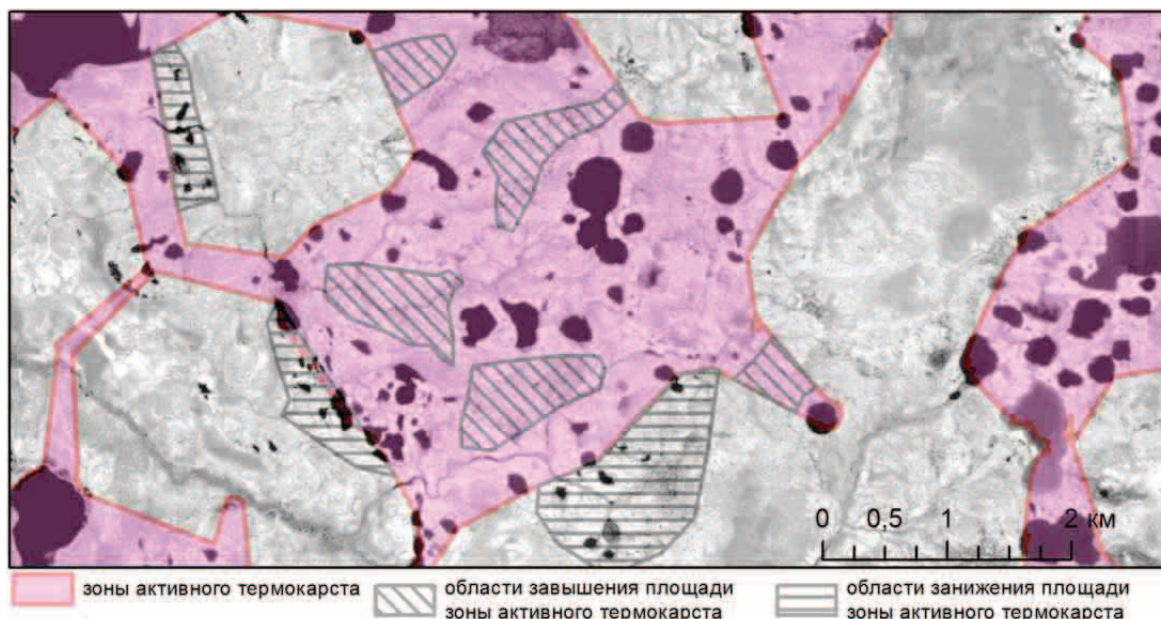


Рис. 5. Фрагмент снимка Канопус-В с обозначенными озерами, зонами активного термокарста и областями завышения и занижения размеров зон

Fig. 5. Fragment of Canopus-B image with designated lakes, zones of active thermokarst and the areas of overstatement and understatement of the zones sizes

ка занижения общей (суммарной) площади зон АТ определялась как относительная величина суммарной площади озер, обнаруженных на снимках высокого разрешения Канопус-В, но не попавших в построенную зону активного термокарста в связи с тем, что эти озера не видны на снимках Landsat. Результаты расчета этой ошибки при задании различных значений d приведены в табл. 2.

Таблица 2. Ошибки занижения площади зон активного термокарста при разных величинах d

Table 2. Errors of understatement of the thermokarst- active zone area at different values of d

Показатель/Index	ТУ TS	Расстояние d , м/Distance d , m				
		500	1000	2000	3000	5000
Относительная суммарная площадь озер, не попавших в границы зоны активного термокарста, % Relative total area of lakes which are not included in the area of the thermokarst-active zone, %	1	50,3	36,7	13,0	2,8	1,2
	2	65,3	54,7	13,4	9,4	3,3
	3	46,6	25,3	9,4	0,0	0,0
	4	46,4	25,1	9,8	6,4	2,1
	5	38,0	21,1	10,0	1,0	0,7
	6	34,8	15,5	7,3	4,3	0,3
	7	37,4	10,7	3,9	1,1	0,7
Средняя ошибка занижения, % Mean error of understatement, %		45,5	27,0	9,5	3,6	1,2

Как видно из табл. 2, слишком малое расстояние между озерами (500 м) при их агрегировании приводит к значительному занижению площади зоны термокарста: суммарная площадь доли озер, не попавших в границы зон АТ при $d=500$ м, составляет на разных ТУ от 35 до 65 % от суммарной

площади зон АТ. При задании расстояния d в пределах 3 и 5 км погрешности невелики: средняя ошибка занижения площади составляет 3,6 и 1,2 % соответственно. На долю этих упущенных объектов приходятся малые озера, находящиеся на удалении более 3 км (или 5) от ближайшего озера, обнаруживаемого на снимке Landsat.

Оценка ошибки завышения площади зон. В нашем исследовании ошибка завышения суммарной площади зон АТ определялась как относительная величина площади участков зоны активного термокарста, в пределах которых на снимках высокого пространственного разрешения озер вообще нет либо обнаруживается их крайне незначительное (статистически незначимое) число. Ошибка завышения рассчитывалась с помощью инструмента «Анализ горячих точек» в программном комплексе геоинформационной системы ArcGIS 10.3. Для этого территория каждого тестового участка разбивалась сеткой 1×1 км на квадраты площадью 100 га. Для каждого квадрата по снимкам Канопус-В была рассчитана доля площади, покрытой озерами (степень заозеренности территории). Это позволило сформировать матрицы данных о степени заозеренности на каждом ТУ. Далее проводился анализ матриц данных с использованием метода пространственного корреляционного анализа, реализованного в алгоритмах инструмента «Анализ горячих точек» в программном комплексе ArcGIS 10.3. На рис. 6 для иллюстрации приведены фрагмент снимка Канопус-В и результат проведения пространственного анализа матрицы данных, полученных по этому снимку.

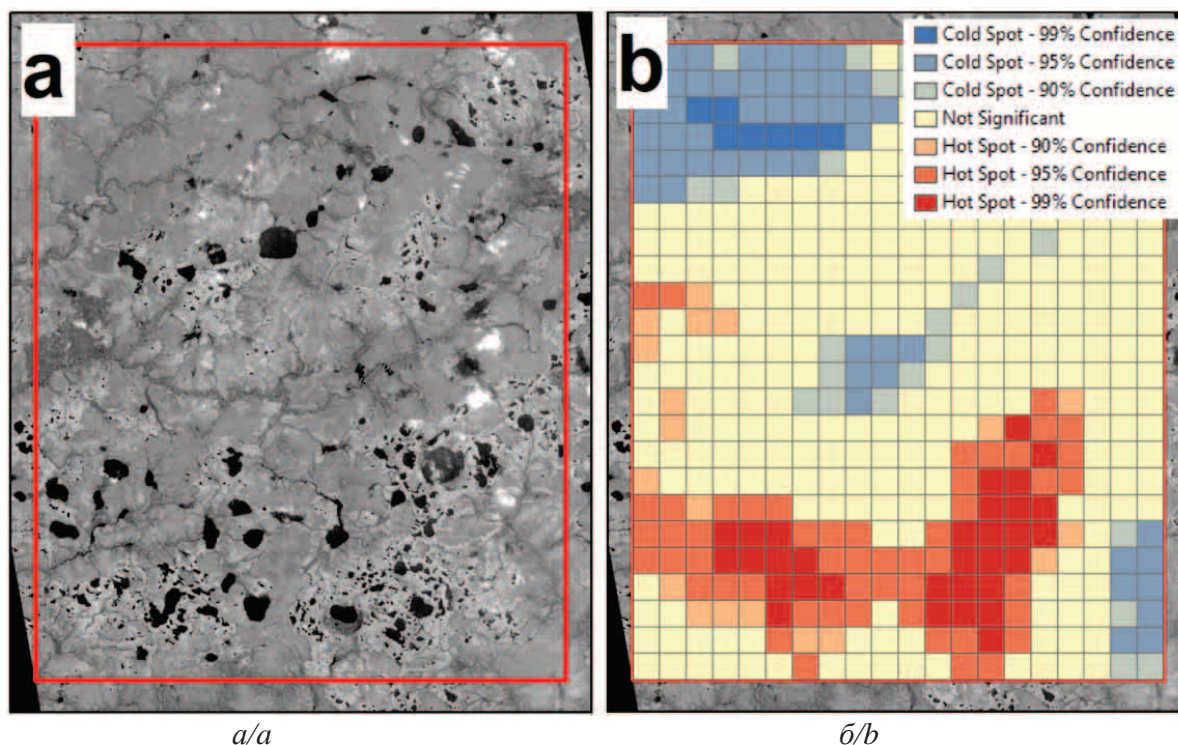


Рис. 6. Фрагмент космического снимка Канопус-В (а) и результат пространственного анализа данных о совокупностях озер на тестовом участке, полученный с применением алгоритма «горячих точек» (б)

Fig. 6. Fragment of Kanopus-B satellite image (a) and the result of a spatial data analysis about set of lakes on the test site based on the algorithm of «hot spots» (b)

Методические вопросы проведения этого пространственного корреляционного анализа данных о площадях озер, реализуемого с помощью алгоритмов инструмента «Анализ горячих точек», достаточно полно изложены в [21, 22]. Этот анализ предполагает вычисление статистического показателя, характеризующего степень сгущения (или разрежения) озер на территории квадратов, на которые разделяется тестовый участок условной сеткой с размером ячейки 1 км. Квадраты с положительными значениями вычисленного статистического показателя с помощью инструмента «Анализ горячих точек» признаются «горячими точками» и отображают области сгущения озер. А квадраты, для которых получены отрицательные значения показателя, называются «холодными точками», показывающими области разрежения озер, т. е. участки территории, на которых озера отсутствуют либо их число незначительно.

На рис. 6, б «горячие» точки показаны красным цветом, а «холодные» – синим. Именно «холодные» точки используются при определении величины ошибки завышения площади зон АТ, возникающей при автоматическом определении границ зон. Для этого путем наложения средствами ГИС полученной матрицы квадратов на карту границ зон активного термокарста можно вычислить для различных значений расстояния d (500, 1000, 2000, 3000 и 5000 м) относительную величину площади участков зон АТ, на которых находятся «холодные» квадраты. Результаты этих вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Ошибки завышения площади зон активного термокарста при разных величинах d

Table 3. Errors of overstatement of the thermokarst-active zones areas at different values of d

Показатель / Index	ТУ TS	Расстояние d , м Distance d , m				
		500	1000	2000	3000	5000
Относительная величина площади участков зоны активного термокарста, в пределах которых озер нет либо их число крайне незначительно, % Relative value of area of the thermokarst-active zones, which contain no lakes or has insignificantly small amount of them, %	1	0,6	1,0	1,3	7,6	10,1
	2	1,7	1,7	2,9	11,1	17,3
	3	1,0	2,5	13,5	16,7	16,7
	4	0,3	3,9	7,7	15,6	21,2
	5	7,2	10,7	17,3	23,5	23,6
	6	0,7	6,1	18,0	20,2	21,5
	7	0,2	5,9	17,7	20,6	21,5
Средняя ошибка завышения, % Mean error of overstatement, %		1,7	4,5	11,2	16,5	18,8

Выбор оптимального расстояния между озерами в процедуре агрегирования. Определение оптимальной величины расстояния d_{opt} при автоматическом построении границ зон активного термокарста может быть осуществлено путем сравнения величин ошибок занижения и завышения площадей зон, полученных экспериментальным путем для различных значений d и приведенных в табл. 2 и 3. Для этого удобно использовать разность величин этих ошибок при разных расстояниях d (табл. 4).

Таблица 4. Разность средних значений ошибок занижения и завышения площади зон при разных расстояниях d

Table 4. Difference between the mean values of errors of overstatement and the understatement of zones area at different distances d

$d, \text{ м}/d, \text{ m}$	500	1000	2000	3000	5000
Разность ошибок, %	43,8	22,5	-1,7	-12,9	-17,6
Difference of errors, %	43,8	22,5	-1,7	-12,9	-17,6

Как видно в табл. 4, в качестве оптимального расстояния d_{opt} может быть выбрана величина расстояния, равная 2000 м, при котором разность величин ошибок занижения и завышения площади зон принимает минимальное значение. При этом, согласно данным табл. 2 и 3, средние значения ошибок занижения и завышения имеют сравнительно небольшие величины (9,5 и 11,2 % соответственно), что показывает практически приемлемую точность определения границ зон активного термокарста на территориях многолетней мерзлоты на основе разработанной методологии.

Пример практического применения разработанной методологии выявления и картографирования зон активного термокарста

В качестве примера практического применения разработанной методологии выявления зон активного термокарста на рис. 7 приведена карта границ зон активного термокарста на территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири, построенная в соответствии с рассмотренной в статье

методологией на основе снимков Landsat-8 в комбинации со снимками высокого пространственного разрешения Канопус-В. На основе обработки и анализа спутниковых материалов, представленных в виде мозаики космических снимков Landsat-8, на указанной территории Западной Сибири выявлено более 260 тыс. озер с суммарной площадью около 1,7 млн га, которые были использованы для построения карты границ зон АТ.

Как видно на рис. 7, в зоне прерывистой мерзлоты Западной Сибири наблюдается значительная неравномерность пространственного распределения очагов возникновения и развития термокарстовых процессов. Используя полученную карту зон АТ, определим некоторые характеристики этих зон, демонстрирующие особенности озерно-термокарстовых равнин в пределах зон активного термокарста на территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири. Суммарная площадь зон активного термокарста равна 9,1 млн га, что составляет около 30 % площади всей территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири, площадь которой равна 30,522 млн га. Заозеренность территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири, определяемая как отношение суммарной площади озер к площади всей территории, составляет 5,5 %. А заозеренность территории в границах зон активного термокарста доходит до 18,4 %, что в 3,4 раза превышает соответствующую величину для всей территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири.

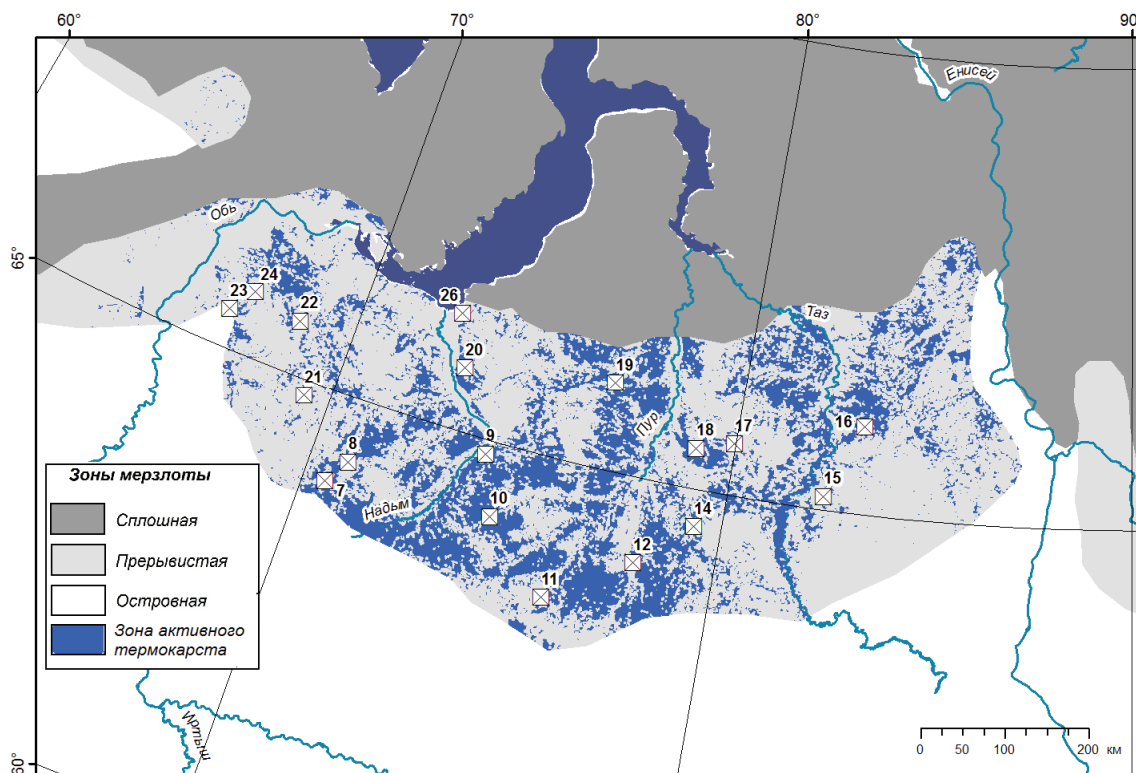


Рис. 7. Карта зон активного термокарста на территории прерывистого распространения мерзлоты Западной Сибири

Fig. 7. Map of thermokarst active zones on the territory of the discontinuous permafrost of Western Siberia

Заключение

В статье разработаны методические вопросы выявления зон активного термокарста на территориях многолетней мерзлоты, отражающих распространённость озерно-термокарстовых ландшафтов, которые в последнее время проявляют заметную изменчивость в условиях глобального потепления. В связи с высокой степенью заболоченности и труднодоступностью этих территорий предлагаемая методология построения зон активного термокарста предполагает использование дистанционных методов исследования полей термокарстовых озёр и средств современных геоинформационных систем для анализа спутниковых изображений.

Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки среднего (Landsat-8) и высокого (Канопус-В) пространственного разрешения, позволившие с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 в автоматическом режиме определять границы зон активного термокарста. Исследованы ошибки занижения и завышения площади зон при автоматическом выявлении их границ по спутниковым снимкам. Показано, что относительные величины этих ошибок составляют около 10 %, что можно счи-

тать приемлемым в большинстве практических задач, связанных с изучением термокарстовых процессов и их проявлений в криолитозоне арктических и субарктических территорий.

Приведенная на рис. 7 карта зон активного термокарста может быть использована для определения и обоснования местоположения тестовых (ключевых) участков для проведения дистанционных исследований динамики термокарстовых процессов и эмиссии парниковых газов из термокарстовых озёр в условиях современных климатических изменений. Карта зон активного термокарста может быть использована при разработке проектов строительства инфраструктуры и других объектов на территории мерзлоты Западной Сибири. Предложенная методология зонирования территории многолетней мерзлоты по степени активности термокарста на основе спутниковых данных может быть использована для построения карт зон активного термокарста и для других районов многолетней мерзлоты.

Работа выполнена в рамках проекта по договору с Минобрнауки РФ № 14.В25.31.0001 (БИО-GEO-CLIM) от 23.06.2013 г. и при поддержке гранта РФФИ по проекту № 15-45-00075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene Carbon / S.A. Zimov, Y.V. Voropaev, I.P. Semiletov, S.P. Davidov, S.F. Prosiannikov, III F.S. Chapin, M.C. Chapin, S. Trumbore, S. Tyler // *Science*. – 1997. – V. 277. – P. 800–802.
- Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // *Метеорология и гидрология*. – 1996. – № 11. – С. 5–12.
- Methane dynamics in different boreal lake types / S. Juutinen, M. Rantakari, P. Kortelainen, J.T. Huttunen, T. Larmola, J. Alm, J. Sivola, P.J. Martikainen // *Biogeosciences*. – 2009. – № 6. – P. 209–223.
- Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling / A.F. Sabrekov, B.R.K. Runkle, M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, S.S. Maksyutov // *Environ. Res. Lett.* – 2014. – № 9. – P. 1–9.
- Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // *Phil. Trans. R. Soc.* – 2007. – V. 365. – P. 1657–1676.
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменения размеров термокарстовых озёр в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. 13. – № 2 – С. 16–26.
- Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S. Audry, J. Viers, B. Dupre // *Biogeosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
- Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озёрах в зоне мерзлоты Западной Сибири / Ю.М. Полищук, В.Ю. Полищук, Н.А. Брыксина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин, Л.С. Широкова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 127–135.
- Полищук Ю.М., Брыксина Н.А., Полищук В.Ю. Дистанционный анализ изменения числа и распределения по размерам малых термокарстовых озёр криолитозоны Западной Сибири // *Исследование Земли из космоса*. – 2015. – № 3. – С. 34–42.
- Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2003. – V. 14. – P. 19–27.
- Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997 // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2000. – V. 11. – P. 55–69.
- Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // *International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – V. 66. – № 4. – P. 423–431.
- Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia / G. Grosse, V. Romanovsky, K. Walter, A. Morgenstern, H. Lantuit, S. Zimov // *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (June 29 – July 3, 2008)*. – Fairbanks, Alaska, 2008. – P. 551–556.
- Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озёр в зоне мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 114–120.
- Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia // *Remote sensing*. – 2014. – № 6. – P. 621–636.
- A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery / C. Verpoorter, T. Kutser, D.A. Seekel, L.J. Tranvik // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – V. 41. – P. 1–7.
- Викторов А.С., Капранова В.Н., Трапезникова О.Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 26–34.
- Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
- Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озёр в России // *Вестник Моск. ун-та. Сер. «География»*. – 2009. – № 3. – С. 33–42.
- Aggregate polygons. URL: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//0013000003p000000> (дата обращения: 25.06.2015).

21. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics // *Geographical analysis*. – 1992. – V. 24. – № 3. – P. 189–206.
22. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application // *Geographical analysis*. – 1995. – V. 27. – № 4. – P. 286–306.

Поступила 23.09.2015 г.

UDC 551.345:528.88

ACTIVE THERMOKARST ZONES ON PERMAFROST TERRITORY AND THEIR DETECTING ON SPACE IMAGES

Yuriy M. Polishchuk,

Ugra Research Institute of Information Technology, 151, Mira Street,
Khanty-Mansiysk, 628011, Russia. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Alexander N. Bogdanov,

Ugra Research Institute of Information Technology, 151, Mira Street,
Khanty-Mansiysk, 628011, Russia. E-mail: bogdanovan@uriit.ru

The relevance of the paper is caused by the need to develop methods of identifying and mapping the areas of active thermokarst processes on the permafrost territory, based on satellite images and geoinformation technologies in the context of assessing the accumulation of methane in thermokarst lakes, which are considered as the most active sources of methane emissions into the atmosphere in the Arctic and sub-Arctic regions in the global warming of recent decades.

The main aim of the study is to develop methodical questions to identify areas of distribution of thermokarst lakes in permafrost and map their boundaries, based on remote sensing and GIS tools.

Methods used in the study: remote sensing of the thermokarst lakes spatial structure, including the little-studied small lakes, using satellite images of middle and high spatial resolution; methods of geographic information systems for spatial and statistical analysis of satellite images of fields of thermokarst lakes in the frozen thermokarst landscapes.

The results. The authors developed methodical questions and described the procedure of active thermokarst zones detection as the areas of the dissemination of thermokarst lakes in the frozen landscape and determination of the boundaries of these zones based on Landsat-8 images and Kanopus-V high resolution images. A collection of Landsat-8 and Kanopus-V images obtained in summer of 2013–2014 was also formed. Using the developed methodology, the authors defined the boundaries and developed the map of active thermokarst zones on the territory of the discontinuous permafrost of Western Siberia.

Key words:

Permafrost, global warming, thermokarst lakes, geoinformation systems, satellite images.

The research was carried out within the framework of the project under the contract with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 14.B25.31.0001 (BIO-GEO-CLIM) dated 23 June, 2013 and supported by RFBR grant No. 15–45–00075.

REFERENCES

1. Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene Carbon. *Science*, 1997, vol. 277, pp. 800–802.
2. Karol I.L. Otsenki kharakteristik odnositelnogo vklada parnikovykh gazov v globalnoe poteplenie klimata [Evaluation of the relative contribution of greenhouse gases in global warming]. *Metereology and hydrology*, 1996, no. 11, pp. 5–12.
3. Juutinen S., Rantakari M., Kortelainen P., Huttunen J.T., Larmola T., Alm J., Sivola J., Martikainen P.J. Methane dynamics in different boreal lake types. *Biogeosciences*, 2009, no. 6, pp. 209–223.
4. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling. *Environ. Res. Lett.*, 2014, no. 9, pp. 1–9.
5. Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget. *Phil. Trans. R. Soc.*, 2007, vol. 365, pp. 1657–1676.
6. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Izmeneniya razmerov termokarstovyykh ozer v razlichnykh rayonakh Rossii za poslednie 30 let [Changes of thermokarst lake areas in different regions of Russia for the last three decades]. *Cryosphere of Earth*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26.
7. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 565–583.
8. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovskiy O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Metodicheskie voprosy otsenki zapasov metana v malykh termokarstovyykh ozerakh v zone merzloty Zapadnoy Sibiri [Methodical issues for evaluating

- methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost of Western Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 127–135.
9. Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Yu. Distantsonnyy analiz izmeneniya chisla i raspredeleniya po razmeram mal'kikh termokarstovykh ozer kriolitozony Zapadnoy Sibiri [Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in cryolithozone of Western Siberia]. *Study of Earth from Space*, 2015, no. 3, pp. 34–42.
 10. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, pp. 19–27.
 11. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. 11, pp. 55–69.
 12. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, no. 4, pp. 423–431.
 13. Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost* (June 29 – July 3, 2008). Fairbanks, Alaska, 2008. pp. 551–556.
 14. Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Analiz izmeneniya chislennosti termokarstovykh ozer v zone merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov [Analysis of changes in the number of thermokarst lakes in permafrost of Western Siberia on the basis of satellite images]. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 114–120.
 15. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia. *Remote sensing*, 2014, no. 6, pp. 621–636.
 16. Verpoorter C., Kutser T., Seekel D.A., Tranvik L.J. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, pp. 1–7.
 17. Viktorov A.S., Kapranova V.N., Trapeznikova O.N. Matematicheskaya model morfologicheskoy struktury ozerno-termokarstovykh ravnin v izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh [Mathematical model of the lacustrine-thermokarst plain morphostructure under the changing climatic conditions]. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 26–34.
 18. Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* [Main problems of landscape mathematical morphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 252 p.
 19. Kravtsova V.I. Rasprostranenie termokarstovykh ozer v Rossii [Dissemination of thermokarst lakes in Russia]. *Vestnik of Moscow State University. Geography*, 2009, no. 3, pp. 33–42.
 20. *Aggregate Poligons*. Available at: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#/0013000003p000000> (accessed 25 June 2015).
 21. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 1992, vol. 24, no. 3, pp. 189–206.
 22. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 1995, vol. 27, no. 4, pp. 286–306.

Received: 23 September 2015.

УДК 556.028

ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА МАЛЫХ МОДЕЛЬНЫХ ВОДОСБОРАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Копысов Сергей Геннадьевич,

кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии
геолого-географического факультета Национального исследовательского
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 36; старший научный сотрудник лаборатории мониторинга
лесных экосистем ИМКЭС СО РАН. E-mail: wosypok@mail.ru

Ярлыков Роман Валерьевич,

студент кафедры гидрологии геолого-географического факультета
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 36. E-mail: yarlykov_92@mail.ru

Актуальность работы обусловлена недостаточностью данных наблюдений на малых водотоках, необходимых для мониторинга климатических изменений, прогноза опасных гидрологических явлений, расчёта водопропускных сооружений и эффективной эксплуатации микрогидроэлектростанций.

Цель работы. Обоснование выбора оптимальных методов организации автоматизированного учёта стока воды и сбора гидролого-климатической информации для моделирования динамики водно-балансовых элементов, а также обеспечения адаптивного землепользования и нужд гидрологического и геохимического мониторинга.

Методы исследования. Из всех элементов водного баланса наиболее точно измеряется поверхностный русловой сток воды, отражающий текущую влажность деятельного слоя на малом водосборе. На трёх малых водосборах в разных природно-климатических условиях были установлены приборы автоматического мониторинга уровня воды, температуры почвы, воды и воздуха, разработанные и произведенные в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Модельные водосборы расположены в зоне олиготрофных болот южной тайги, зоне бугристых болот лесотундры и предгорной зоне южной тайги. Для учёта стока воды использовались различные методы гидравлических расчётов: для неподтопленного водослива круглого сечения с широким порогом; для равномерного движения в естественных руслах; для треугольного водослива с подтопленным нижним бьефом. Для определения шероховатости поверхности конкретного водослива проводились измерения стока гидрометрическим методом – вертушкой, а при малых расходах – объёмным методом. Измерения уровня и других метеорологических параметров выполнялись с интервалом 1 час и сохранялись в блоке управления.

Результаты. Выявлена эффективность всех трёх способов организации учёта стока воды. Собраны уникальные данные по условиям формирования водного баланса и стока на малых водотоках. Показана огромная роль увлажнённости деятельного слоя водосборов для возникновения экстремальных расходов воды.

Ключевые слова:

Мониторинг стока, модельный водосбор, водный баланс, лесотундра, южная тайга.

Ввиду природных особенностей Западная Сибирь является малонаселённой территорией. Слабая заселённость территории предопределяет ее слабую изученность, так как гидрологическая и метеорологическая сети приурочены к населённым пунктам, а потому характеризуют в основном большие и средние реки [1] и приречные территории, а не водораздельные пространства [2].

В то же время принято считать, что изменение климата в северных широтах оказывает существенное влияние на гидрологические процессы и это должно проявляться в изменениях структуры водного баланса и его внутригодовом распределении, а также качестве воды [3]. Однако фактических данных наблюдений для подобных утверждений не всегда достаточно. Поэтому на Западе [3–5] и у нас [6, 7] большое внимание уделяют естественным и антропогенным изменениям в растительном покрове во взаимосвязи с гидрологическими процессами. На практике это помогает обеспечить развитие адаптивного земледелия и рациональное использование водных ресурсов с сохранением их

экологической роли, в том числе за счёт энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе водных ресурсов путем создания наименее экологически вредных микрогидроэлектростанций.

Для решения упомянутых проблем реализуется проект «Международной сети экспериментальных водосборов», которые охватывают широкий спектр гидроклиматических условий для проведения сравнительных исследований [3], а также нами проводятся исследования в рамках проекта СО РАН: «Экосистемные процессы в Сибири под воздействием природных факторов регионального и глобального уровня (№ государственной регистрации 01201353357)» при поддержке гранта по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. (БИО-GEO-CLIM), грантов РФФИ (№ 14–05–00700 и др.).

Одним из вариантов получения необходимой гидрометеорологической информации является создание разъездных гидрометрических отрядов для организации автоматизированной сети наблюдений [1]. Оптимальная численность такого отряда 4–5 че-

ловек, но нам удавалось создавать только временные отряды из 2–3 человек за счёт студентов-практикантов и заинтересованных сотрудников.

Количественная оценка разнообразия и динамики ландшафтных условий (экосистемных изменений) формирования стока необходима для расчета элементов водного баланса и прогноза его изменения. Использование для этих целей подробных математических моделей опирается в общеизвестную проблему отсутствия необходимых исходных данных. Поэтому наиболее согласованной с точностью задания внешних условий является интегральная, а не дифференциальная форма записи уравнений теплового и водного баланса, связанных между собой единым элементом – испарением [2, 8]. Так как условия формирования стока не только весьма разнообразны, но и тесно взаимосвязаны, то рассматривать их следует с помощью интегральных параметров.

Наиболее общим индикатором экосистемных изменений в климатоэкологических системах является изменение влажности деятельного слоя ландшафтов. Влажность деятельного слоя обусловлена воздействием природных факторов регионального и глобального уровня. Климатические факторы выражаются количеством выпадающих осадков и теплоэнергетическими ресурсами испарения, которые определяются не только температурой, но и дефицитом влажности воздуха.

Для расчёта водного баланса отдельных элементов ландшафта (элементарных водосборов) лучше всего подходит метод гидролого-климатических расчетов (ГКР) проф. В.С. Мезенцева [2, 8]. Основная идея метода ГКР заключается в том, что водный и тепловой балансы должны рассматриваться совместно в их неразрывной связи, а также во взаимосвязи с почвенным покровом, с учетом его водных и физических свойств [1, 2]. Главным достоинством метода ГКР является генетическая обоснованность и гибкость расчетных зависимостей с ясным физическим смыслом всех входящих в них параметров, а также возможность в явном или неявном виде выразить любой их элемент [9].

Из всех элементов водного баланса наиболее точно измеряется поверхностный русловой сток воды, отражающий текущую влажность деятельного слоя на малом водосборе. Влажность деятельного слоя помимо климатических факторов интегрально учитывает влияние растительного и почвенного покровов, а также условия дренированности территории водосбора (рельеф). Точность измерения стока значительно превышает точность измерения осадков, особенно в зимний период, а потому уже достаточно давно разработаны методики для расчёта слоя осадков на водосборе по измеренному стоку, так называемый гидрологический контроль осадков.

Самым надежным способом изучения формирования стока является анализ разумно организованных исследований и наблюдений в природе [10]. Для этих целей используют репрезентативные (ти-

пичные для того или иного гидрологического режима) и экспериментальные (с целенаправленным вмешательством в их состоянии) водосборы.

В свое время [11] предполагалось, что наблюдения на малых водосборах автоматом приведут к появлению новых гидрологических знаний, но этого не произошло, что объясняется отсутствием руководящей теории при организации таких наблюдений [10]. Для переноса знаний с малых водосборов на более крупные территории нужна адекватная процессам моделирующая система, подразумевающая сравнение ряда параметров этих территорий. Причем для полноценного восприятия и понимания информация должна быть спрессованной и оптимально организованной [10]. У нас есть метод, отвечающий этим требованиям, – метод ГКР [12–14].

В качестве репрезентативных водосборов естественнее всего использовать элементарные водосборы площадью 0,01–1 км² (в исключительных случаях – до 10 км²) с четкой выраженностью водораздельной линии и возможностью надежного измерения стока [10].

Для наших целей на трёх малых водосборах в разных природно-климатических условиях были установлены приборы автоматического мониторинга уровня воды, температуры почвы, воды и воздуха. Приборы разработаны и произведены в Институте мониторинга климатических и экологических систем (ИМЭКС) СО РАН на основе автономного измерителя профиля температуры (АИПТ) [15]. На водомерных постах установлены системы автоматического мониторинга САМУВ с двумя датчиками уровня воды и при необходимости с измерительным водосливом из легких материалов, не нарушающих условия стока. Измерения уровня и других метеорологических параметров выполнялись с интервалом 1 час и сохранялись в блоке управления. Так интервал измерений позволяет учитывать внутрисуточные колебания стока, но и не переполняет память избыточной информацией.

При необходимости для учета шероховатости поверхности конкретного водослива проводились измерения стока гидрометрическим методом – вертушкой, а при малых расходах – объёмным методом. Для получения данных об уклоне водной поверхности проводится периодическая (раз в год) нивелировка высотного положения датчиков уровня воды [16].

За период ледовых явлений данные отбраковываются, так как для их использования требуется проведение специальных натуральных наблюдений для введения в расчёт поправочных коэффициентов.

Первые автоматизированные наблюдения за стоком были организованы в июле 2011 г. на ручье Коровинском, берущем своё начало с западного склона Бакчарского болота и пересекающем автомобильную дорогу Р-399 в 500 м до впадения в р. Бакчар, между д. Полынянка и с. Поротниково Бакчарского района Томской области. Данный ру-

чей является аналогом р. Ключ, который хорошо изучен в гидрологическом плане [17]. Площадь водосбора руч. Коровинского составляет 22 км², т. е. превышает допустимые размеры для репрезентативного водосбора и, кроме того, из-за высокой степени заболоченности (более 70 %) не имеет однозначной линии водораздела

Для организации автоматизированного учёта стока воды здесь использовалась водопропускная железобетонная труба через автомобильную дорогу, обладающую, как нам казалось, устойчивым сечением русла. Расчёт стока выполнялся по схеме неподтопленного водослива круглого сечения с широким порогом (рис. 1). Методика расчёта изложена в специальной литературе по гидравлике [18, 19]. К сожалению, из-за обвала в апреле 2014 г. устойчивость сечения русла была нарушена, при этом возникла реальная угроза разрушения дорожного полотна. Сейчас пункт закрыт, а ввиду несоответствия водосбора требованиям, предъявляемым для репрезентативных водосборов, восстанавливать его непродуктивно.

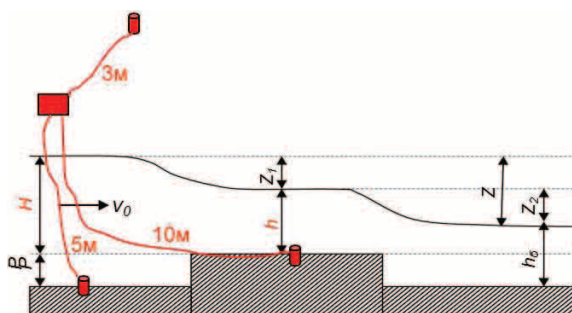


Рис. 1. Схема организации учёта стока воды на водопропускном сооружении с помощью САМУВ

Fig. 1. Scheme of the organization of the water runoff accounting at the culvert construction using SAMUW

Однако наблюдения были организованы своевременно и позволили получить гидрограф стока за экстремально сухой 2012 г. На рис. 2 видно, что осенние дождевые паводки 2013 г. превосходили снеговое половодье в 2012 г. Это объясняется тем, что засуха 2012 г. (из-за малоснежной зимы 2011–2012 гг.) привела к осушению деятельного

слоя заболоченных территорий (пересохший торф теряет водоудерживающую и водопропускную способность) и он перестал выполнять водорегулирующую функцию. По всей видимости, именно это создало предпосылки для возникновения оползневых процессов на водопропускной трубе под автотрассой.

Вторым модельным водосбором стал верхний левый приток реки Седэ-Яха в Ямало-Ненецком автономном округе на модельном участке Новый Уренгой – Пангоды (65°49'42" с. ш., 75°24'01" в. д.). Водосбор площадью 19 км² представляет собой участок лесотундры с преобладанием бугристых болот на песчаных грунтах и высокой степенью озерности. На прирусловой наиболее дренированной территории встречается угнетенный лиственничный лес. Наблюдения ведутся с августа 2014 г. Расчёт расхода выполняется по гидравлическим формулам для равномерного движения в естественных руслах [18] с коэффициентом шероховатости, вычисленным по инструментальным измерениям расхода воды. Уклон водной поверхности определяется по показаниям двух датчиков уровня воды.

Экспедиционные обследования этой территории до 90-х годов прошлого века проводил Государственный гидрологический институт (ГГИ) [20], сейчас там ведётся активная эксплуатация нефтегазовых месторождений.

Для исследуемого водосбора характерны существенные внутрисуточные колебания метеорологических элементов (рис. 3), которые приводят к существенным внутрисуточным амплитудам стока воды. На рисунке уровень воды определяется по левой шкале, а температура (°C) и относительная влажность (%) воздуха – по правой. К сожалению, наблюдения за метеорологическими параметрами были прерваны 16 мая 2015 г. ввиду попадания воды в блок управления. Для нас это стало полной неожиданностью, так как прибор был установлен в лиственничном лесу на 2 м выше межени уровня в ближайшем ручье и в 15 м в сторону от него. Возможность затопления казалась нереальной. Однако резкое повышение 14 мая температуры воздуха до 14,3 °C вызвало такое же резкое увеличение снеготаяния на заболоченных частях водосбора и, как результат, повышение уровня воды до максимума 362 см в полночь 19 мая.

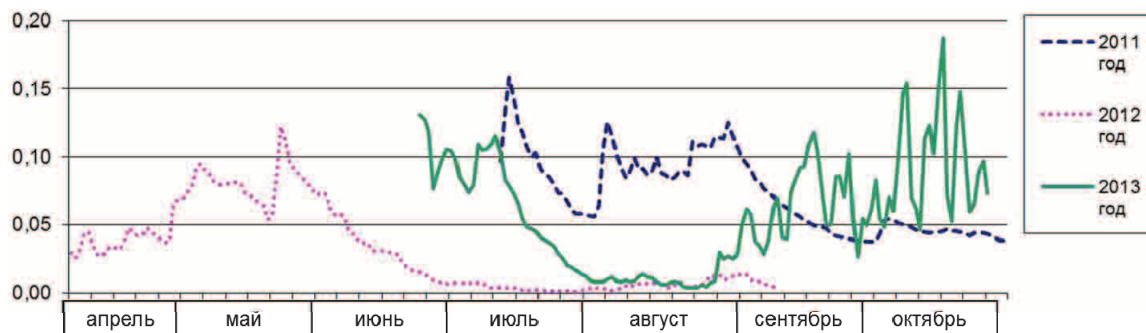


Рис. 2. Измеренные расходы воды в руч. Коровинском, м³/с

Fig. 2. Measured water flow into the Korovinskiy stream, m³/s

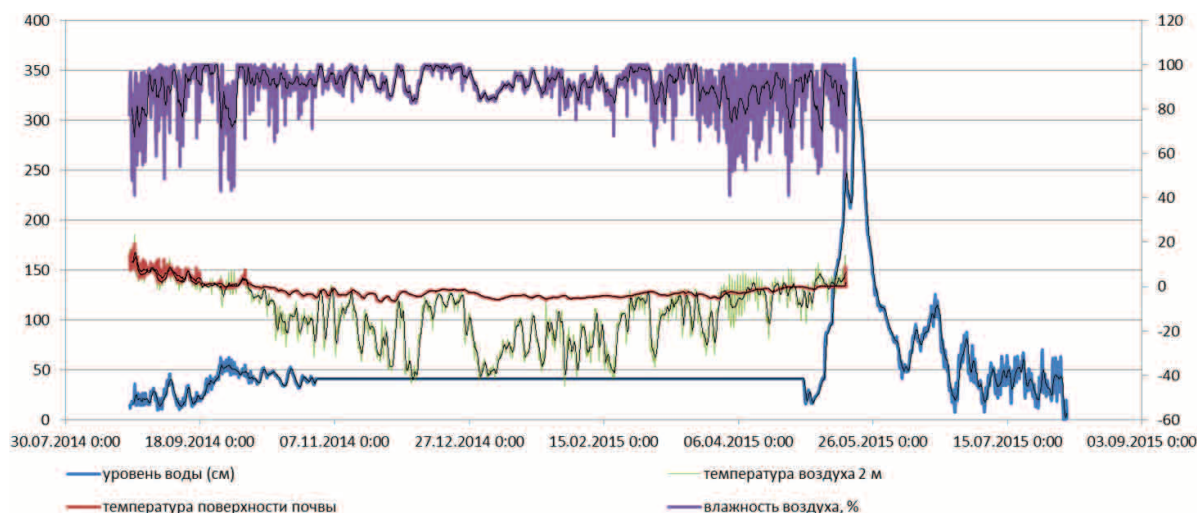


Рис. 3. Метеорологический и гидрологический режим на модельном участке Новый Уренгой – Пангоды

Fig. 3. Meteorological and hydrological regime at the model catchment Novy Urengoy – Pangody

Общая продолжительность пика половодья составила всего 2,5 недели (с 8 по 26 мая), после чего имели место паводки, вызванные выпадением дождевых осадков с наложением на базовый сток, состоящий из озерно-аккумулятивной воды и вод из растаявших грунтов, что подтверждает наличие в осенний период корреляционной связи стока воды с температурой деятельного слоя.

К сожалению, исследования на данном водосборе весьма затратны и проводятся эпизодически, что приводит к существенным разрывам в рядах наблюдений. Продолжение мониторинга на данном водосборе после 2016 г. по финансовым причинам, скорее всего, будет прекращено.

Третьим модельным водосбором стал «Северо-Алтайский модельный водосбор» в 30 км от Томска в бассейне реки Киргизка, на ручье Корольковском с площадью водосбора 1,99 км². Он отвечает всем необходимым требованиям и с 2015 г. является базовым для проведения комплексного ландшафтно-гидрологического (экосистемного) мониторинга.

Учёт стока ведется с помощью треугольного водослива с подтопленным нижним бьефом (рис. 4). Также на водосборе установлена экспериментальная система автоматического мониторинга элементов водного баланса (САМ ЭВБ). Данная система позволяет учитывать суммарный климатический сток за период наблюдений, которые проводятся в ручном режиме (взвешивание собранной воды с перерасчётом на слой стока). Поэтому система требует дальнейшей доработки – установки второго датчика для измерения интенсивности стока. Другие параметры (интенсивность поступления влаги при недостаточном увлажнении почвогрунта и скорость его иссушения за счёт испарения) определяются автоматически.

По данным САМ ЭВБ, за период с 25 июня по 26 августа 2015 г. климатический сток составил 126 мм, испарение – 90 мм, а продуктивные осадки – 219 мм. Руслевой сток на водосливе за это время составил 71 мм, следовательно, запас влаги на водосборе за этот период увеличился на 55 мм.

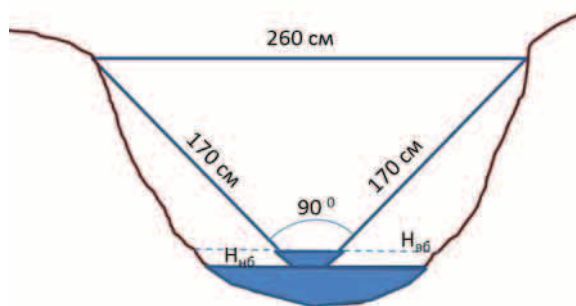
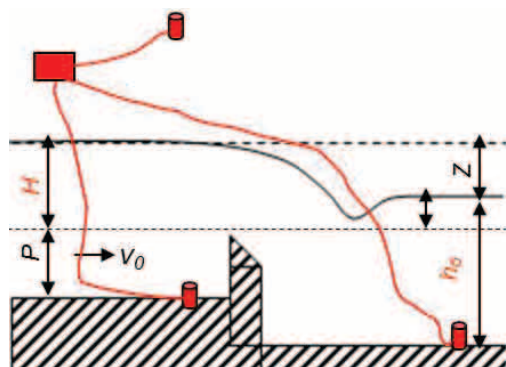


Рис. 4. Схема организации учёта стока воды с помощью САМУВ на треугольном водосливе с подтопленным нижним бьефом

Fig. 4. Scheme of the organization of the water runoff accounting using SAMLUV on the triangular weir with a partially drowned downstream

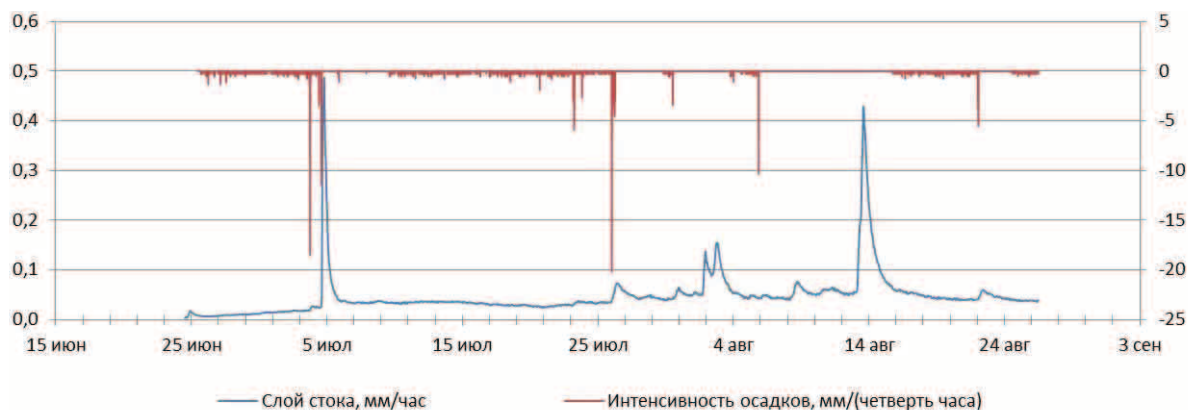


Рис. 5. Ход стока воды в ручье Корольковском в зависимости от увлажненности

Fig. 5. Speed of runoff water into the Korolkovskiy stream depending on the moisture content

Из рис. 5 следует, что, по данным САМ ЭВБ, максимальная интенсивность поступления влаги 20,1 мм/четверть часа наблюдалась 26 июля 2015 г. (правая шкала), после длительного засушливого периода, а потому эти осадки вызвали лишь незначительное повышение стока воды в ручье (левая шкала). В то же время 14 августа был паводок при насыщенных водой почвогрунтах и незарегистрированной интенсивности поступления осадков, так как почти все осадки пошли на формирование стока, а интенсивность стокообразования прибором не измеряется. Прямая линия интенсивности осадков на рис. 5 указывает на насыщенность почвогрунтов влагой, т. е. на избыточную увлажненность деятельного слоя.

Заключение

Организация полевых гидрометеорологических отрядов и обустройство водосборов автоматизированными системами мониторинга уровня и

температурного режима позволяет организовать учета стока воды на малых водотоках. Выявлена эффективность всех трёх рассмотренных способов организации учёта стока воды. Выбор схемы учёта стока определяется местными особенностями русла и наличием подходящих водопропускных сооружений, что встречается крайне редко.

Собранные уникальные данные по условиям формирования водного баланса и стока на малых водотоках создают основу для проведения долгосрочного мониторинга климатических изменений на ландшафтной основе, позволяют повысить точность прогноза опасных гидрологических явлений, достоверность расчёта водопропускных сооружений и обеспечить эффективную эксплуатацию микрогидроэлектростанций.

Анализ результатов наблюдений указывает на существенную роль увлажненности деятельного слоя водосборов при формировании экстремальных расходов воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков С.М. Проблемы гидрологического изучения заболоченных территорий Западной Сибири в связи с их хозяйственным освоением // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 11. – С. 108–116.
- Карнацевич И.В., Бикбулатова Г.Г., Ряполов К.В. Перспективы генетического метода расчета элементарного стока по суточным интервалам // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (104). – С. 224–231.
- Catchment scale estimates of flow path partitioning and water storage based on transit time and runoff modeling / C. Soulsby, K. Piegat, J. Seibert, D. Tetzlaff // Hydrological Processes. – 2011. – V. 25. – № 25. – P. 3960–3976.
- Bonta J.V., Muller M. Evaluation of the Glugla method for estimating évapotranspiration and groundwater recharge // Hydrological Sciences. – 1999. – № 44 (5). – P. 743–761.
- A combination of remote sensing data and topographic attributes for the spatial and temporal monitoring of soil wetness / M. Temimi, R. Leconte, N. Chaouch, P. Sukumal, R. Khanbilvardi, F. Brissette // Journal of Hydrology. – 2010. – № 388. – P. 28–40.
- Калинин В.М., Ларин С.И., Романова И.М. Малые реки в условиях антропогенного воздействия (на примере Восточного Зауралья). – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 1998. – 220 с.
- Спицына Т.П., Куприянова Т.М., Охримов Е.А. Лесогидрологические процессы в бассейнах малых рек предгорий Восточных Саян // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 6. – С. 28–34.
- Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 168 с.
- Ткачев Б.П., Булатов В.И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы (Сер. «Экология». Вып. 64). – Новосибирск, 2002. – 114 с.
- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 320 с.
- Родда Джон К. Исследования речных бассейнов // Грани гидрологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – С. 309–354.
- Kopysov S.G. Evaluating water balance elements for hydro-morphic landscapes by hydrophysical properties of soil cover // Water Resources. – 2015. – V. 42. – № 1. – P. 23–27.
- 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. – V. 72. – № 3. – P. 380–385. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207233.2015.1010876> (дата обращения: 22.09.2015).

14. Копысов С.Г. Параметрический учет ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчётов // География и природные ресурсы. – 2014. – № 3. – С. 157–161.
15. Кураков С.А., Крутиков В.А., Ушаков В.Г. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 5. – С. 166–167.
16. Копысов С.Г., Карпов А.В., Хон А.В. Автоматизированный учёт стока воды для изучения гидрологических характеристик ландшафта // Десятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. – Томск: Изд-во «Аграф-Пресс», 2013. – С. 73–74.
17. Савичев О.Г., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К. Гидрологическое обоснование хозяйственного освоения торфяных болот (на примере водосбора реки Ключ, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 155–162.
18. Рапинчук С.Ф. Гидравлика и гидрология. – М.: Лесная промышленность, 1982. – 271 с.
19. Перевозников Б.Ф. Расчеты максимального стока при проектировании дорожных сооружений – М.: Транспорт, 1975. – 304 с.
20. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под. ред. С.М. Новикова. – СПб.: ВВМ, 2009. – 536 с.

Поступила: 05.11.2015.

UDC 556.028

EXPERIENCE IN ORGANIZATION OF HYDROLOGICAL AND CLIMATIC OBSERVATIONS AT SMALL MODEL CATCHMENTS OF WEST SIBERIA

Sergey G. Kopysov,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,
Russia; Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskii Avenue,
Tomsk, 634055, Russia. E-mail: wosypok@mail.ru

Roman V. Yarlykov,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,
Russia. E-mail: yarlykov_92@mail.ru

The relevance of the work is due to insufficient observational data on small watercourses required for climate change monitoring, dangerous hydrological phenomena forecast, culvert installations calculation and efficient exploitation of micro-hydro power plants.

The main aim of the study: to justify the choice of optimum methods of automated water runoff accounting and hydrological and climate information collecting for modeling the dynamics of water-balance elements, as well as, to ensure an adaptive land management and the needs of hydrological and geochemical monitoring.

The methods used in the study. Of all the elements of water balance it is the surface water runoff that is most accurately measured, reflecting the current active layer moisture on a small watershed. Instruments (designed and manufactured at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of SB RAS) for the automatic monitoring of water level, of soil, water and air temperatures were established on three small catchments in the diverse climatic conditions. Model watersheds are located in a zone of oligotrophic swamps of southern taiga, in a zone of frost mound bog of forest tundra and mountain zone of southern taiga. Various methods of hydraulic calculations were used for water runoff account: the first one for free overfall round in section broadcrested weir, the second one for uniform motion in natural channels, the third one for the triangular weir with partial drowned downstream. To determine the surface roughness of a certain water flow the measurements of the flow were performed by means of a hydrometric method (current meter) or a volumetric method for low water discharge. The measurements of a level and other meteorological parameters were carried out with an interval of 1:00 and were saved in the control unit.

Key words:

Monitoring of runoff water, model catchment, water balance, forest tundra, southern taiga.

REFERENCES

- Novikov S.M. Problemy gidrologicheskogo izucheniya zabolochennykh territoriy Zapadnoy Sibiri v svyazi s ikh khozyaystvennym osvoeniem [Problems of hydrological study of wetlands in Western Siberia due to their economic development]. *Russian meteorology and hydrology*, 1988, no. 11, pp. 108–116.
- Karnatsevich I.V., Bikbulatova G. G., Ryapolov K. V. Perspektivy geneticheskogo metoda rascheta elementarnogo stoka po su-tochnym intervalam [Perspectives of genetic method for calculation of elementary run-off on daily intervals]. *Omsk Scientific Bulletin*, 2011, no. 1 (104), pp. 224–231.
- Soulsby C., Piegat K., Seibert J., Tetzlaff D. Catchment scale estimates of flow path partitioning and water storage based on transit time and runoff modeling. *Hydrological Processes*, 2011, vol. 25, no. 25, pp. 3960–3976.
- Bonta J.V., Muller M. Evaluation of the Glugla method for estimating évapotranspiration and groundwater recharge. *Hydrological Sciences*, 1999, no. 44 (5), pp. 743–761.
- Temimi M., Leconte R., Chaouch N., Sukumal P., Khanbilvardi R., Brissette F. A combination of remote sensing data and topographic attributes for the spatial and temporal monitoring of soil wetness. *Journal of Hydrology*, 2010, no. 388, pp. 28–40.
- Kalinin V.M., Larin S.I., Romanova I.M. Malye reki v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya (na primere Vostochnogo Zauralya) *Small rivers under anthropogenic influence (on example of East Zauralje)*. Tumen, Tumen state University Press, 1998. 220 p.
- Spitsyna T.P., Kupriyanova T.M., Okhrimov E.A. Lesogidrologicheskie protsessy v basseynakh malykh rek predgoriy Vostochnykh Sayan [The forest hydrological processes in the small river basins of the Eastern Sayan Foothills]. *The Bulletin of Kras-GAU*, 2015, no. 6, pp. 28–34.
- Mezentsev V.S., Karnatsevich I.V. *Uvlazhnennost Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Wetness of West Siberian Plain]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 168 p.
- Tkachev B.P., Bulatov V.I. *Malye reki: sovremennoe sostoyanie i ekologicheskie problemy* [Small rivers: state-of-the-art and ecological problems]. Novosibirsk, 2002. 114 p.
- Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Sovremennye problemy gidrologii* [Modern problems of hydrology]. Moscow, Akademiya, 2008. 320 p.
- Rodda J.K. Issledovaniya rechnykh basseynov. *Grani gidrologii*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. pp. 309–354.
- 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.
- 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. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207233.2015.1010876> (accessed 22 September 2015).
- Kopysov S.G. Parametricheskii uchet landshaftnykh usloviy stoka v metode gidrologo-klimaticheskikh raschetov [The parametric inclusion of landscape runoff conditions in the method of hydroclimatic calculations]. *Geography and Natural Resources*, 2014, no. 3, pp. 157–161.
- Kurakov S.A., Krutikov V.A., Ushakov V.G. Avtonomnyy izmeritel profilya temperatury AIPT [Autonomous temperature profile gauge AIPT]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, no. 5, pp. 166–167.
- Kopysov S.G., Karpov A.V., Khon A.V. Avtomatizirovannyi uchet stoka vody dlya izucheniya gidrologicheskikh kharakteristik landshafta [Automated water runoff calculations for hydrology characteristics study of the landscape]. *Desyatoe sibirskoe soveshchanie po klimato-ekologicheskomu monitoringu*, Tomsk, 2013. pp. 73–74.
- Savichev O.G., Bernatonis P.V., Bernatonis V.K. Gidrologicheskoe obosnovanie khozyaystvennogo osvoeniya torfyanykh bolot (na primere vodosbora reki Kluch, Zapadnaya Sibir) [Hydrological substantiation of economic development of marshes (the Kluch river basin, Western Siberia)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 155–162.
- Rapinchuk S.F. *Gidravlika i gidrologiya* [Hydraulics and hydrology]. Moscow, 1982. 271 p.
- Perevoznikov B.F. *Raschety maksimalnogo stoka pri proektirovanií dorozhnykh sooruzheniy* [Runoff calculations in road design]. Moscow, Transport Publ., 1975. 304 p.
- Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Wetland hydrology of permafrost zone of the Western Siberia]. St. Petersburg, 2009. 536 p.

Received: 5 November 2015.

УДК 622.271.693.68.241

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Аброськин Александр Сергеевич,

соискатель кафедры управления промышленными предприятиями
Национального исследовательского Иркутского государственного
технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
E-mail: abroskin_38@mail.ru

В статье дан обзор истории создания средств автоматизации и роботизации горнотранспортного оборудования, разобран принцип функционирования таких технологий, как «Карьер» и «Интеллектуальный карьер», произведен расчет экономического эффекта работы технологии «Интеллектуальный карьер». Проведенный анализ существующих систем автоматизации открытых горных работ и тенденций развития технологий управления показал, что создание роботизированных систем является наиважнейшей задачей развития открытых горных работ как для горнодобывающих предприятий России, так и для экономики РФ в целом.

Цель работы: обоснование целесообразности использования первой российской системы безлюдной добычи полезных ископаемых. Проведение анализа тенденций развития автоматизированных технологий добычи на горных предприятиях. Обоснование научно-методических принципов и этапов реализации роботизированной системы. Проведение оценки экономической эффективности использования роботизированных систем на открытых горных работах.

Методы исследования. В работе использованы методы системного, структурно-функционального и факторного анализа, научного обобщения, математической статистики, натурного эксперимента, математического моделирования технико-экономических показателей работы роботизированной системы грузоперевозок.

Результаты. Проведено технико-экономическое обоснование использования роботизированной системы при открытой добыче полезных ископаемых. Обоснование научно-методических принципов и этапов создания роботизированной системы добычи на горных предприятиях. Проведен анализ современного состояния, перспектив и общих тенденций развития автоматизированных систем управления горно-транспортным комплексом. Дано заключение, что создание роботизированных систем грузоперевозок обеспечит безопасность открытых горных работ, повышение эффективности и производительности труда, даст возможность добычи полезных ископаемых в труднодоступных регионах со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями.

Ключевые слова:

Спутниковая навигация, горное дело, диспетчеризация, роботизация, бортовая система, программное обеспечение, интеллектуальный карьер, экономический эффект.

Преобладающим направлением развития мировой горной промышленности в ближайшей перспективе считается открытый способ разработки месторождений, обеспечивающий наилучшие экономические показатели. На долю открытого способа добычи в рудниках, на карьерах и разрезах приходится свыше 80 % мировой горной продукции, в США – 83 %, в странах СНГ – около 70 %. В России открытым способом добывается 91 % железных руд, более 70 % руд цветных металлов, более 60 % угля. При этом происходит увеличение глубины и масштабов открытых горных работ как в нашей стране, так и за рубежом (см. таблицу) [1, 2, 3].

Дальнейшее эффективное развитие открытых горных работ в значительной степени зависит не только от применения новых разнообразных видов горного и транспортного оборудования, но и от ускоренной разработки и широкого внедрения на карьерах современных автоматизированных систем управления горнотранспортными комплексами с использованием спутниковой навигации.

Информационные компьютерные технологии стали широко применяться в горнодобывающей промышленности в последнее десятилетие XX в. Падение цен на металлы в этот период и, как следствие этого, экономический спад в горнодобывающих отраслях промышленности явились стимулирующими факторами к развитию и внедрению на горных предприятиях информационных технологий для плани-

рования и управления производством. Главная цель внедрения таких технологий состояла в повышении эффективности работы горного предприятия за счет улучшения организации производства, оптимизации ведения горных работ, минимизации затрат и потерь на всех этапах добычного цикла и снижения таким образом себестоимости конечной продукции. Так совпало, что в начале 90-х годов, а именно после операции «Буря в пустыне», разработанные ранее для военных целей системы глобального позиционирования (GPS) стали доступны для гражданского применения. Горная промышленность стала одной из первых отраслей эффективного применения навигационных технологий для задач мониторинга и диспетчеризации мобильного оборудования карьеров. Внедрение системы диспетчеризации позволило горным компаниям повысить на 10–15 % общую производительность предприятия и тем самым несколько смягчить последствия экономического спада в добывающих отраслях.

На сегодняшний день все более актуальным становится вопрос применения GPS- технологий в различных производственных процессах. С развитием промышленности в различных отраслях производства возрастает потребность контроля производственного процесса в реальном времени, что, в свою очередь, дает возможность принятия своевременных решений, направленных на улучшение результатов работы [4].

Но как показывает практика, в некоторых отраслях этот вопрос актуален из-за высокой потребности в качественных натуральных GPS-измерениях, съемках и наблюдениях высокой точности. Особо остро этот вопрос стоит в тех отраслях, где GPS-наблюдения считались неприемлемыми, например открытые горные работы повышенной глубины. В условиях глубокого карьера прием спутникового сигнала зачастую оказывается затруднен, что может замедлить или остановить работу систем управления горнодобычным оборудованием.

Также необходимо отметить, что проблемой глубоких карьеров является ухудшающиеся горно-геологические и горнотехнические условия разработки месторождений (необходимость работы вблизи высоких откосов уступов, сложность проветривания и др.), осложняющие технологические процессы выемки и транспортировки горной массы и оказывающие негативное воздействие на людей [5]. Воздействие вредных факторов производства на персонал, обслуживающий экскаваторно-автомобильный комплекс, на 52,8 % неустранимо в силу сочетания особенностей технологического процесса и климата, при этом определяющим фактором является вибрация. Наиболее часто подвержены профессиональным заболеваниям водители большегрузных самосвалов (59,9 %) и машинисты экскаваторов (15,1 %) [6–8].

Возрастание интенсивности производственных процессов, усложнение условий работы технологического транспорта, ужесточение требований к охране труда и промышленной безопасности, к охране окружающей среды и освоению недр обуславливает необходимость внедрения на горных предприятиях высокоэффективных технологий добычи полезных ископаемых – малолюдных, а в перспективе и безлюдных. Переход к таким технологиям является перспективным не только с точки зрения безопасности, но и снижения издержек, связанных с созданием комфортных и безопасных условий труда [9, 10].

Технологии открытых горных работ включают четыре основных связанных между собой последовательных технологических этапа: 1) подготовка пород к выемке; 2) выемочно-погрузочные работы; 3) перемещение (транспортирование) горной массы; 4) разгрузка и складирование горной массы [11–13].

Все современные зарубежные системы управления на горных работах основаны на использовании спутниковой навигации. Начиная с 2009 г. была запущена в эксплуатацию аналогичная, но более точная российская система спутниковой навигации – ГЛОНАСС.

В настоящее время на российском рынке в сфере автоматизации управления горнотранспортными комплексами работают как отечественные фирмы («ВИСТ Групп», «Союзтехноком», «Промтех» и др.), так и зарубежные («Modular» (США), «Wenco» (Канада), «Micromine» (Австралия) и др.)

Таблица. Самые глубокие карьеры в мире

Table. The deepest career in the world

Название Name	Местоположение Location	Глубина, м Depth, m	Размер, км*км Size, km*km	Добываемое полезное ископаемое Minerals recovered
Эскондида Нотр Escondida Notr	Чили Chile	500	1,6-1,4	Медь, золото, серебро Copper, gold, silver
Ковдорский ГОК Kovdorsky GOK	Россия Russia	500	2,3-1,6	Железная руда, апатит, бадделейт Iron stone, apatite, baddeleyite
Бату-Худжау Batu Hijau	Индонезия Indonesia	550	2,5-2,2	Золото, медь Gold, copper
Сибайский карьер Sibay quarry	Россия Russia	600	2,0-2,0	Медь, цинк, сера Copper, zinc, sulfur
Мурунтау Muruntau	Узбекистан Uzbekistan	600	3,5-2,5	Золото Gold
Эскондида Escondida	Чили Chile	620	3,8-2,7	Медь, золото, серебро Copper, gold, silver
Удачный Udachny	Россия Russia	640	1,7-1,3	Алмазы Diamonds
Палабора Palabora	ЮАР Republic of South Africa	700	1,9-1,7	Медь Copper
Чукикамата Chuquicamata	Чили Chile	850	4,3-3	Медь, золото, серебро, рений, селен Copper, gold, silver, rhenium, selenium
Бингем Каньон Kennecott Bingham Canyon Mine	США USA	1200	4-3,8	Медь, молибден, золото Copper, molybdenum, gold

Особенностью зарубежных автоматических систем управления горнотранспортными комплексами (АСУ ГТК), применяемых на открытых горных работах, является то, что они разрабатывались с широким использованием средств вычислительной техники, а в качестве алгоритма оптимального управления грузоперевозками использовались решения на ЭВМ задач назначения с применением теории линейного и динамического программирования. Для обеспечения оперативной связи диспетчера с водителями автосамосвалов в системах широко используется радиосвязь [14].

Объектом управления с помощью системы автоматизации в нашем случае являются горнотранспортные комплексы, представляющие собой лишь часть, но наиболее важную, общей технологической системы карьера. Здесь ГТК включает в себя погрузочные средства (экскаваторы), транспортные средства (автосамосвалы, локомотивосоставы), вспомогательную технику (бульдозеры, ковшовые погрузчики) и дорожно-строительную технику (грейдеры, скреперы). В состав ГТК входят также карьерные дороги, отвалы вскрышных пород, перегрузочные пункты, внутрикарьерные или вскрышные склады полезного ископаемого.

Таким образом, в структуре ГТК можно выделить две основные части – мобильную и стационар-



Рис. 1. Структура роботизированной системы на горном предприятии

Fig. 1. Structure of the robotic system at a mining enterprise

ную, причем последнюю часть можно считать условно стационарной, так как дороги и отвалы меняют свое положение в пространстве по мере отработки карьера. Однако для управления их можно считать стационарными.

Принципы создания роботизированных систем заключаются в модернизации элементов существующих АСУ ГТК на горных предприятиях, а именно бортовых систем, систем передачи данных, позиционирования и навигации, программного обеспечения.

Основными компонентами системы являются (рис. 1):

- оборудование мобильных объектов (автосамосвалов, экскаваторов, бульдозеров, погрузчиков, локомотивов и т. п.), включающее интеллектуальную панель ИП-01 с сенсорным дисплеем, оборудование системы передачи данных (роутер, кабельные линии связи и др.), навигационный блок на основе приемника GPS/ГЛОНАСС, систему контроля загрузки с интегрированной системой контроля давления в шинах, различные датчики (уровня топлива, давления в системе пневмоподвески, в гидравлической системе и др.);
- широкополосные системы передачи данных (Motorola MESH, Wi-Fi, Интернет и др.);
- оборудование диспетчерского центра, административных зданий, удаленных пользователей и т. п.;
- рабочих мест пользователей;
- программное обеспечение.

В странах СНГ и ближнего зарубежья лидером по числу внедрений является система диспетчеризации горнотранспортного комплекса «Карьер», которая была разработана компанией «Вист Групп» в рамках соглашения о стратегическом партнерстве с РУПП «Белорусский автомобильный завод» и внедряется на горных предприятиях с 1999 г.

Основные компоненты АСУ ГТК «Карьер» и их функции (рис. 2):

- бортовая система – представляет собой совокупность аппаратно-программных средств, которые осуществляют управление карьерной техникой, а также сбор навигационной и телеметрической информации о состоянии узлов и агрегатов и передачу информации в диспетчерский центр;
- система навигации GPS/ГЛОНАСС – обеспечивает определение координат и скорости карьерной техники;
- система передачи данных – обеспечивает прием-передачу телеметрической информации и управляющих воздействий, аудио-, визуальной и аварийной информации, а также навигационной информации: скорости и координат;
- программное обеспечение – осуществляет управление отдельными единицами карьерной техники и работой карьера в целом [15].

Стоит заметить, что система диспетчеризации «Карьер» явилась отправной базовой технологией для создания современной автоматизированной (в перспективе роботизированной) системы управления ГТК «Интеллектуальный карьер».

Функционирование системы «Интеллектуальный карьер» происходит через взаимодействие ее основных блоков:

1. Бортовое оборудование – позволяет осуществлять управление карьерной техникой, сбор навигационной и телеметрической информации о состоянии узлов, агрегатов самосвала и осуществлять передачу информации в диспетчерский центр.

Бортовое оборудование состоит:

- из бортового комплекса для осуществления дистанционного управления техникой;
- системы распознавания препятствий и предотвращения столкновений;

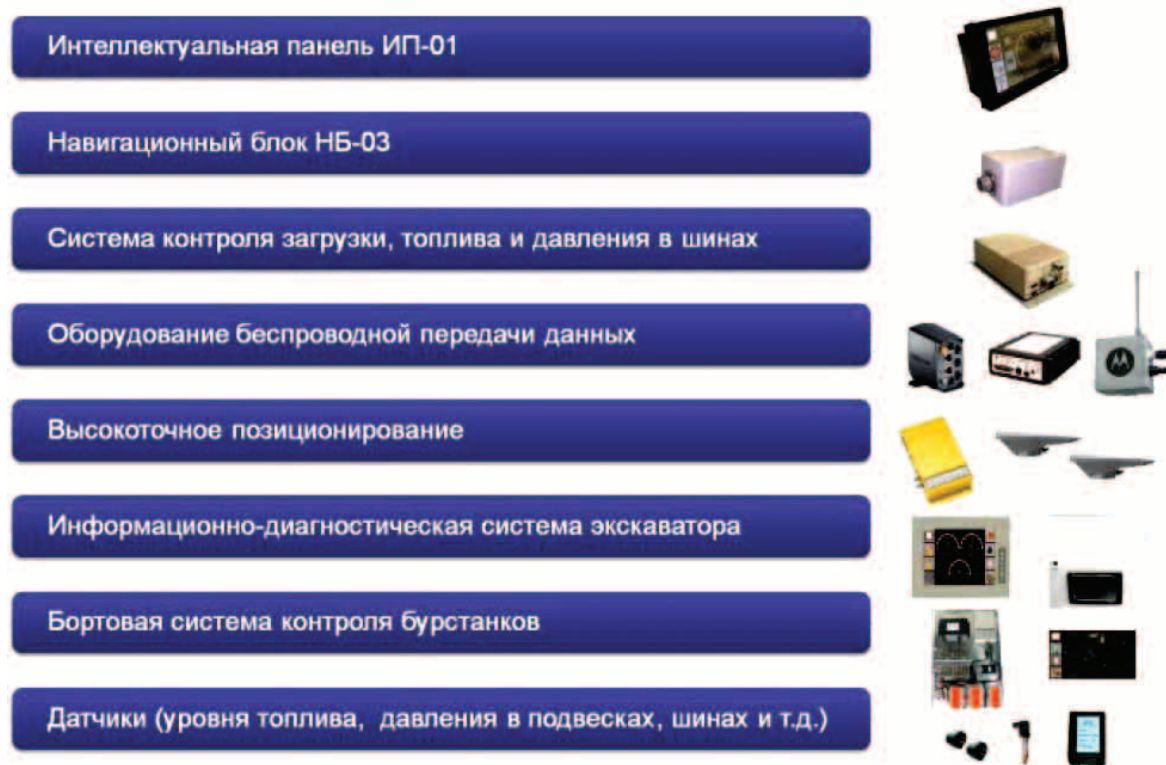


Рис. 2. Состав бортовых систем и оборудования АСУ ГТК «Карьер»

Fig. 2. Composition of the board systems and SCC «Mine» equipment automation

- центрального управляющего бортового компьютера для решения задач управления техникой и согласования бортовых программных систем.
- 2. Система навигации – обеспечивает определение координат и является высокоточной для всего парка карьерной техники и инерциальной, т. е. автономной, не требующей наличия внешних сигналов.
- 3. Система передачи данных – обеспечивает прием и передачу телеметрической информации и управляющих воздействий. Для этого используются широкополосные высокоскоростные системы передачи данных (MESH, Wi-Fi, WiMAX) и создаются дублирующие и резервные каналы связи для управления техникой.
- 4. Программное обеспечение – осуществляет управление отдельными единицами карьерной техники и в целом работой карьера.

В системе источники и потребители информации связаны между собой с помощью каналов беспроводной передачи данных. Источниками информации выступают датчики местоположения на основе навигационных приемников глобальной навигационной системы GPS/ГЛОНАСС, скорости, технического и эксплуатационного состояния узлов и агрегатов, а также цифровая модель карьера, где отображается положение объектов управления, геометрия и топология маршрутных дорог. В качестве потребителей информации выступают

диспетчерский центр и другие инженерные службы предприятия [16, 17].

Бортовое оборудование представляет собой программно-аппаратный комплекс на основе контроллера или промышленного компьютера, осуществляющий сбор, обработку и передачу в диспетчерский центр телеметрической информации о состоянии карьерной техники, в том числе навигационной и диагностической [18].

Создание системы «Интеллектуальный карьер» отражает мировую тенденцию развития горных технологий. Для России эта система обеспечит не только техническую и экономическую безопасность открытых горных работ, но и повышение эффективности горных предприятий, производительности труда, возможность добычи полезных ископаемых в труднодоступных регионах с неблагоприятными природно-климатическими условиями.

В случае роботизированной системы должно быть предусмотрено несколько независимых бортовых компьютеров (контроллеров) с соответствующими группами сенсоров, отвечающих за решение отдельных задач автоматического управления:

- бортовой комплекс для обработки данных интеллектуальной системы распознавания препятствий на основе лидаров, радаров или иных технических средств. Программное обеспечение этого компьютера (контроллера) должно

непрерывно сравнивать построенную цифровую модель с эталонной моделью, переданной из диспетчерского центра. Расхождение в моделях будет означать появление препятствий, требующих остановки техники или переход на дистанционное управление;

- бортовой комплекс для осуществления дистанционного управления техникой;
- центральный управляющий бортовой компьютер (контроллер) для решения задач управления техникой и согласования взаимодействия всех бортовых программных подсистем.

Перечисленные бортовые комплексы связаны с соответствующими сенсорными устройствами: лидарами, радиочастотными метками и считывателями, видеокамерами, навигационными приемниками, датчиками дистанционного управления, а также комплексом средств управления карьерной техникой.

Для создания роботизированной системы необходимо на все единицы техники устанавливать оборудование системы высокоточной навигации, позволяющее определять не только местонахождение техники с точностью до нескольких сантиметров, но и ее ориентацию. Важно отметить, что применение высокоточной навигации для всего парка мобильной техники карьера позволит передавать огромные массивы информации при дистанционном управлении техникой и с помощью 3D-модели карьера отображать на цифровой карте реальное положение техники и отдельных ее частей. Для этого необходимо также установить дополнительные датчики для определения положения стрелы, ковша экскаватора, передавать данные от лидаров и систем предотвращения столкновений. Диспетчер сможет управлять карьерной техникой, используя цифровую модель участков горных работ и 3D-модель взаимного расположения автосамосвала и, например, экскаватора, и обращаться к видеоизображению как к вспомогательному, а не основному.

В АСУ ГТК на все мобильные объекты устанавливается навигационное оборудование на основе навигационных приемников GPS, обеспечивающих точность в диапазоне ± 5 см. Данную точность обеспечивают стандартные навигационные приемники без станций дифференциальной поправки. Этой точности достаточно для осуществления мониторинга и управления парком горного оборудования. Высокоточными системами навигации могут оснащаться экскаваторы для осуществления селективной выемки, а также буровые станки – для наведения станка на точку бурения и автоматизированного исполнения задания по отработке плана бурения.

Для обеспечения сантиметровой точности, которая необходима для разезда транспортных средств на технологической дороге, а также позиционирования роботизированного транспортного средства на карте во избежание коллизий и автономного движения по записанному маршруту с

учетом ширины дороги для данного типа автосамосвала осуществляется дифференциальная коррекция сигналов спутниковых систем с помощью контрольного навигационного приемника GPS, называемого базовой станцией. Базовая станция устанавливается в точке с известными географическими координатами. Сравнивая известные координаты с измеренными координатами, полученными от бортовой навигационной системы, приемник базовой навигационной станции формирует поправки, передаваемые по радиоканалу на борт в режиме RTK (от англ. Real Time Kinematic) для коррекции определения местоположения самосвала. Дифференциальные поправки передаются в формате RTCM SC-104 со скоростью не менее 2400 бит/с и задержкой не более 0,5–2 с.

На открытой местности прием сигнала осуществляется 4–12 спутниками одновременно, что обеспечивает точность позиционирования автосамосвала и движение по заданной траектории с сантиметровой точностью. В системе управления АСУ ГТК должна быть предусмотрена возможность отображения местоположения роботизированного автосамосвала на цифровой карте местности на дисплее рабочего места оператора.

Точность позиционирования зависит от ряда факторов, в том числе погрешности оборудования навигационных спутников, ошибки GPS-приемника и ошибки распространения спутникового сигнала. Источниками ошибок могут быть следующие причины [19]: недостаточное количество видимых спутников в северных широтах и глубоких карьерах; неточность эфемерид и ошибки спутниковых часов; помехи, связанные с изменением условий приема сигналов со спутников; задержка по времени в аппаратуре приемника; проблемы, связанные с питанием навигационного устройства; ионосферная и тропосферная задержка; а также помехи, связанные с переотражением сигнала в железорудных карьерах.

Для повышения надежности, непрерывности получения навигационной информации и обеспечения высокой точности автоматического движения по траектории целесообразна интеграция бортового приемника глобальной навигационной спутниковой системы с инерциальными системами навигации. Данные системы не используются в традиционных АСУ ГТК из-за высокой стоимости. Оптимально применение слабо связанной навигационной системы на основе блока бесплатформенной инерциальной системы (БИНС) и двухканального навигационного приемника GPS. Данный вариант относительно прост в реализации и позволяет использовать стандартные компоненты.

Инерциальная система обеспечивает выдачу информации об относительном перемещении роботизированного автосамосвала, в то время как приемник GPS позволяет определять его положение в глобальной системе координат. Также система характеризуется высоким темпом выдачи информации – порядка 100 Гц. Глобальная спутниковая навигационная система обладает меньшей часто-

той выдачи информации (10 Гц) и не накапливает ошибки. В итоге по данным спутниковой навигационной системы и инерциальной навигации обеспечивается удержание автосамосвала на заданной траектории движения.

Алгоритмы программного обеспечения бортового компьютера управляют контроллером для осуществления движения автосамосвала с заданной скоростью по выбранному маршруту к месту загрузки или разгрузки в автоматическом режиме на основании данных системы высокоточной спутниковой навигации, обеспечивают снижение скорости и торможение по данным системы предупреждения столкновений, а также аварийный останов.

Для обеспечения надежности определения местоположения техники необходимо использовать совместные ГЛОНАСС/GPS-сигналы, обеспечивающие заведомо большее число видимых спутников, а также сеть базовых станций дифференциальных поправок.

Для более точного и надежного определения координат, даже при кратковременном отсутствии данных от дифференциальной станции или отсутствии видимости спутников, необходимо применять системы инерциальной навигации, основанные на гироскопах. Совместное использование спутниковой и инерциальной систем навигации позволит обеспечить высокую точность определения местоположения.

В современных системах управления горно-транспортными комплексами используются различные системы беспроводной передачи данных, а также комбинации таких систем, как УКВ-связь, транкинговые системы, широкополосные системы передачи данных, сотовые системы связи. В последние годы для построения систем управления все большее применение находят широкополосные системы и технологии беспроводной передачи данных: Wi-Fi, WiMax, MESH-системы и др., обеспечивающие надежное радиопокрытие и высокую скорость, необходимую для передачи видеоизображений, диагностической информации и решения задач оперативного управления горнотранспортным комплексом.

Исходя из проведенного анализа систем связи для АСУ ГТК и объемов передачи, принципами, относящимися к системе передачи данных для создания роботизированной линии, являются:

- поддержка стандарта передачи данных 802.11n со скоростью до 300 МБит/с для осуществления удаленного управления роботизированной техникой. Помимо передачи данных управления необходимо также в режиме реального времени передавать в центр управления видеоизображения с нескольких камер от каждой единицы техники, данные от системы распознавания препятствий, навигационную и телеметрическую информацию о состоянии техники;
- резервирование каналов связи, которое обеспечивается использованием передачи данных на разных частотах.

Программное обеспечение роботизированной системы – наиболее сложная, творческая и наукоемкая интеллектуальная компонента системы. От эффективности построения и работы программного обеспечения во многом зависит эффективность системы в целом. Разработка программного обеспечения системы во многом базируется на программно-алгоритмических средствах системы автоматизированного управления и мониторинга горнотранспортного комплекса, ключевым программным модулем которой является система «Автоматической диспетчеризации» для оптимизации и оперативного управления техникой карьера.

Для достижения максимальной производительности системы необходимо, чтобы карьерная техника не останавливалась и не прекращала свою работу даже при кратковременном отсутствии связи или задержке в обработке данных на сервере. Для этого необходимо обеспечить максимальную автономность бортового оборудования, которое позволит продолжать движение или работу техники даже при кратковременном отсутствии связи с сервером.

Бортовое программное обеспечение, помимо функций управления рабочими органами карьерной техники, контроля расстояний до препятствий, распознавания препятствий, определения местоположения и ориентации, должно осуществлять безопасное движение по заранее заданному маршруту, а также обеспечить возможность разъезда с другими участниками движения без участия центрального сервера системы. Основные функции сервера: контроль безопасности движения, оповещение оператора при возникновении нештатных ситуаций, когда требуется непосредственное удаленное управление автосамосвалами и другой техникой, решение оптимизационных задач и ведение цифровой модели карьера, а также оптимизация работы ГТК.

До последнего времени горнодобывающая промышленность тратила на программные средства автоматизации всего порядка 1 % своего бюджета, причем в основном не на внедрение АСУ. Это значительно меньше, чем в других областях тяжелой промышленности. Только в настоящее время наметились тенденции к увеличению инвестиций в АСУ, в том числе в автоматизированную систему управления ГТК.

В то же время сроки окупаемости инвестиций, вложенных во внедрение АСУ ГТК, составляют от 2–3 месяцев до 1–1,5 лет. При этом повышение производительности оборудования может составлять 15–20 % и более, в зависимости от внедряемой системы, степени ее освоения персоналом, количества и состава мобильных объектов и других конкретных условий предприятия [5].

Расчет экономической эффективности внедрения системы «Интеллектуальный карьер» производился в период с 2012 по 2015 г. на разрезе Тугуйский (рис. 3).

Основные предположения при анализе эффективности:

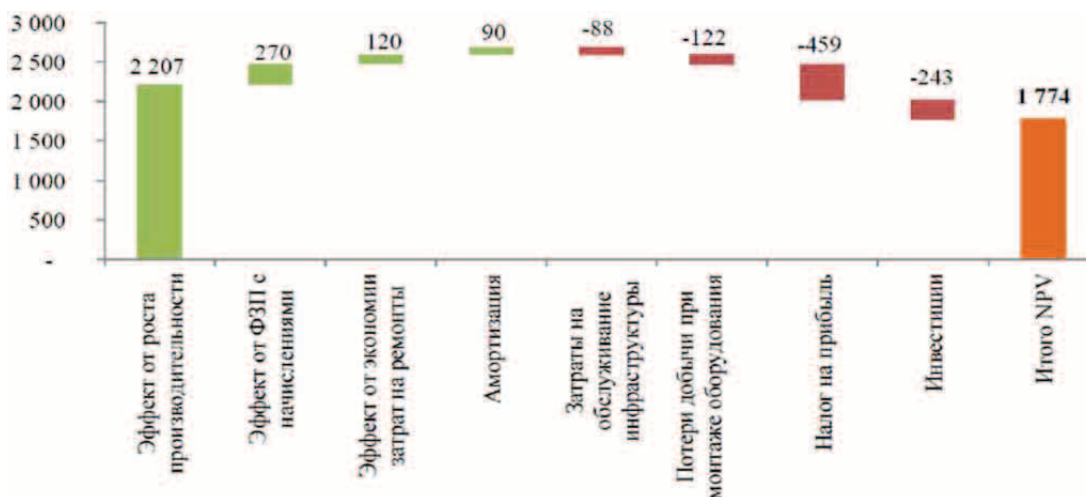


Рис. 3. Структура NPV 2012–2015 гг., млн руб.

Fig. 3. NPV structure 2012–2015, million rubles

1. Система устанавливается на весь парк горнодобывающей техники, участвующей в добыче.
2. Один оператор в диспетчерском центре контролирует работу 5 самосвалов или 5 экскаваторов.
3. Время на установку бортовой системы: самосвал – 2 суток, экскаватор – 5 суток.
4. Сотрудникам, работающим с системой, повышается заработная плата на 30 %.
5. В силу уже имеющейся развитой инфраструктуры разреза в анализе эффективности не оценивался эффект от экономии средств на строительство инфраструктуры.

Расчет эффективности системы производился в условиях отсутствия сбытовых ограничений.

В данных условиях было получено:

- NPV в период с 2012 по 2016 г. 1774 млн руб.;
- наибольший эффект достигается за счет увеличения производительности разреза на 10 %;
- необходимые капитальные затраты для реализации проекта на разрезе Тугнуйский составили 292 млн руб.

В свою очередь, Д.А. Клебанов [20] показал, как затраты на создание роботизированной технологии на участке «породный бункер – отвал» разреза «Черногорский» при достижении плановых значений внедрения системы 6–9 месяцев окупаются менее чем за 2 года. Это свидетельствует об

экономической обоснованности применения роботизированных систем на данном участке.

Заключение

Разработка роботизированной системы представляет собой сложную научно-техническую задачу, решение которой связано с капитальными затратами на роботизированную технику, инфраструктуру связи, бортовое оборудование, изменение технологии и регламентов грузоперевозок, согласование проекта и технических решений в местных органах федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (РОСТЕХНАДЗОР).

Система «Интеллектуальный карьер», бесспорно, дает высокие расчетные показатели и имеет высокий прикладной потенциал. В расчете не учитывался такой эффект, как отсутствие необходимости строить социальную инфраструктуру для персонала, что особенно актуально для строящихся предприятий, расположенных в труднодоступных регионах с суровыми климатическими условиями.

Создание роботизированных систем грузоперевозок обеспечит безопасность открытых горных работ, повышение эффективности и производительности труда, возможность добычи полезных ископаемых в регионах со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтурин Ю.А. Современное состояние карьерного транспорта // Каталог-справочник «Горная Техника – 2005». URL: <http://probelaz.ru/ru/help/usefull/36.html>
2. Бахтурин Ю.А., к.т.н., Современные тенденции развития карьерного транспорта. Семинар № 16, 2009, с. 403–414
3. Мельников Н.Н., Козырев А.А., Лукичев С.В. Большие глубины – новые технологии // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 4. – С. 58–66.
4. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 343 с.
5. Новожилов М.Г., Селянин В.Г., Трен А.Е. Глубокие карьеры. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 318 с.
6. Зарипова С.Н. Обеспечение безопасного функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов угледобывающих предприятий: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Кемерово, 2008. – 268 с.

7. Лобанов Н.Я., Грачев Ф.Г., Лихтерман С.С. Организация планирования и управления производством в горной промышленности: учебник для вузов. – М.: Недра, 1989. – 516 с.
8. Материалы компании Parker Bay Mining. Анализ рынка карьерной техники. URL: <http://parkerbaymining.com/mining-equipment/earthmoving-equipment.htm> (дата обращения: 14.10.2014).
9. Анистратов К.Ю. Разработка стратегии технического перевооружения карьеров // Горная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 90–104.
10. Перепелицын А.И., Китляйн Е.Е., Клебанов Д.А. Комплексная система управления промышленной безопасностью и оценки рисков на горнодобывающих предприятиях // Горный журнал. – № 7. – 2012. – С. 55–59.
11. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Производственные процессы: учебник для вузов. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
12. Открытые горные работы: справочник. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.
13. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Основы горного дела: учебник. – М.: Академический проект, 2010. – 264 с.
14. Tu J.N., Hueka V.S. Analysis of open truck haulage system by use of a computer model // CiM Bulletin. – 1985. – № 7. – P. 53–59.
15. Современные системы управления горнотранспортными комплексами / К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров. – СПб.: Наука, 2007. – 344 с.
16. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining // Autonomous Mining. – 2012. – May. – P. 30–32.
17. Miller J.E. La mise au point de dispositifs de pilotage automatique de camions de carrieres // Industrie Mineral. – 1982. – V. 64. – P. 3–6.
18. Авершина Д.В. Оценка экономической эффективности внедрения автоматизированной системы «Интеллектуальный карьер» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – Номер S2. – С. 111–117.
19. Клебанов А.Ф., Владимиров Д.Я., Рыбак Л.В. Система диспетчеризации большегрузных самосвалов «Карьер» на разрезе «Черниговский»: структура, функциональность, экономическая эффективность // Горная промышленность. – 2003. – № 1. – С. 52–56.
20. Клебанов Д.А. Разработка технико-технологических решений по созданию и применению роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах. – М.: ИПКОН РАН, 2015. – 135 с.

Поступила 24.11.2015 г.

UDC 622.271.693.68.241

THE USE OF MODERN SYSTEMS OF AUTOMATION OF OPEN CAST MINING

Aleksandr S. Abroskin,

National Research Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russia. E-mail: abroskin_38@mail.ru

The paper reviews the history of mining and transport equipment automation and robotization, operation principle of such technologies as the «Mine» and «Intelligent mine» is described, economic impact of the technology «Intelligent mine» is calculated.

The analysis of existing systems of automation of open cast mining and technology trends of management showed that the creation of robotic systems is the most important task of the development of open pit mining.

The purposes of the work are: to substantiate the need to use the first Russian system of deserted mining, to analyze the trends in the development of automated production technologies in mining enterprises, to justify scientific and methodological principles and stages of the robotic system implementation, to assess economic efficiency of robotic systems implementation at open cast mining.

Research methods: methods of system, structural-functional and factor analysis, scientific analysis, mathematical statistics, natural experiment, mathematical modeling of technical and economic performance of the robotic system transportation.

Results. The authors conducted a feasibility study on the use of a robotic system for open pit mining, justified scientific and methodological principles and steps of creation of a robotic production system at mining enterprises, determined that the creation of robotic transport systems will ensure the safety of open mining operations and the improvement of efficiency and productivity and will also allow mining in difficult natural and climatic regions with the difficult geological and mining conditions.

Key words:

Satellite navigation, mining, scheduling, robotics, on-board system, software, intelligent mine, economic effect.

REFERENCES

1. Bakhturin Yu.A. Sovremennoe sostoyanie karernogo transporta [The current state of quarry transport]. *Business Directory «Mining Equipment – 2005»*, URL: <http://probelaz.ru/ru/help/usefull/36.html>
2. Bakhturin Yu.A. Sovremennye tendentsii razvitiya karernogo transporta [Current trends of quarry transport]. Seminar № 16, 2009, pp. 403–414
3. Melnikov N.N., Kozyrev A.A., Lukichev S.V. Bolshie glubiny – novye tekhnologii [The depth – new technologies]. *Bulletin of the Kola Scientific Center RAS*, 2013, no. 4, pp. 58–66.
4. Genike A.A., Pobedinskiy G.G. *Globalnye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ikh primeneniye v geodezii* [Global satellite positioning systems and their application in geodesy]. Moscow, Kartgeotsentr Publ., 2004. pp. 343.
5. Novozhilov M.G., Selyanin V.G., Tren A.E. *Glubokie karery* [Deep mines]. Moscow, Gosgortekhzdat Publ., 1962. 318 p.
6. Zaripova S.N. *Obespechenie bezopasnogo funktsionirovaniya ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksov ugledobyvayushchikh predpriyatiy*. Dis. Dokt. nauk [Ensuring safe operation of excavator-automobile complexes of the coal mining enterprises. Dr. Diss.]. Kemerovo, 2008. pp. 268.

7. Lobanov N.Ya., Grachev F.G., Likhtherman S.S. *Organizatsiya planirovaniya i upravleniya proizvodstvom v gornoj promyshlennosti* [Organization of planning and management in the mining industry]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 516 p.
8. *Materialy kompanii Parker Bay Mining. Analiz rynka karernoy tekhniki* [Market analysis of mining equipment]. Available at: <http://parkerbaymining.com/mining-equipment/earthmoving-equipment.htm> (accessed 14 October 2014).
9. Anistratov K.Yu. Razrabotka strategii tekhnicheskogo perevoruzheniya karerov [Development strategies of technical rearmament of quarries]. *Mining*, 2012, no. 4, pp. 90–104.
10. Perepelitsyn A.I., Kitlyayn E.E., Klebanov D.A. Kompleksnaya sistema upravleniya promyshlennoy bezopasnostyu i otsenki riskov na gornodobyvayushchikh predpriyatiyakh [A comprehensive system of industrial safety and risk assessment at the mining enterprises]. *Mining Journal*, 2012, no. 7, pp. 55–59.
11. Rzhavskiy V.V. *Otkrytye gornye raboty. Proizvodstvennyye protsessy* [Open pit mining. Production processes]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
12. *Otkrytye Gornye Raboty* [Open Pit Mining]. Moscow, Gornoe byuro Publ., 1994. 590 p.
13. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. *Osnovy gornogo dela* [Basics of mining]. Moscow, Akademicheskii proekt Publ., 2010. pp. 264.
14. Tu J.N., Hueka V.S. Analysis of open truck haulage sistem by use of a computer model. *CiM Bulletin*, 1985, pp. 53–59.
15. Trubetskoy K.N., Kuleshov A.A., Klebanov A.F., Vladimirov D.Ya. *Sovremennyye sistemy upravleniya gorno-transportny-mi kompleksami* [Modern control systems of mining transport complex]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2007. pp. 344.
16. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining. *Autonomous Mining*, 2012, pp. 30–32.
17. Miller J.E. La mise au point de dispositifs de pilotage automatique de camions de carrieres. *Industrie Mineral*, 1982, vol. 64, pp. 3–6.
18. Avershina D.V. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti vnedreniya avtomatizirovannoy sistemy «Intelktualnyy karer» [Evaluation of the economic efficiency of the automated system of «Intelligent mine»]. *Mountain information-analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, pp. 111–117.
19. Klebanov A.F., Vladimirov D.Ya., Rybak L.V. Sistema dispetcherizatsii bolshегruznykh samosvalov «Karer» na razreze «Chernigovskiy»: struktura, funktsionalnost, ekonomicheskaya effektivnost [The system of dispatching large trucks «Mine» in the section «Chernigov»: structure, functionality, cost effectiveness]. *Mining*, 2003, no. 1, pp. 52–56.
20. Klebanov D.Ya. *Razrabotka tekhniko-tekhnologicheskikh resheniy po sozdaniyu i primeneniyu robotizirovannykh system gruzoperevozok na otkrytykh gornyykh rabotakh* [Development of technical and technological solutions for the creation and use of robotic systems of cargo at open cast mining]. Moscow, IPKON RAS Press, 2015. pp.135.

Received: 24 November 2015.

УДК 622.333:622.324:658:336.221

НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ОБЛАСТИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ И НАЛОГООБЛОЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ МЕТАНА В ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ

Шубина Елена Андреевна,

аспирантка кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; заместитель директора ООО «Сибгеопроект», Россия, 650066, г. Кемерово, пр. Октябрьский, 28б.
E-mail: Lena_shubina@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич,

доктор технических наук, профессор-консультант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: lev@tpu.ru

Актуальность работы заключается в необходимости формировании комплексного подхода к разработке метаноугольных месторождений с внедрением самостоятельной промышленной добычи метана из угольных пластов.

Цель работы. Изучить состояние угледобывающей отрасли Кузбасса, провести анализ объемов добычи угля по способам отработки запасов. Проанализировать количество выбросов метана в атмосферу угольными шахтами. Показать необходимость изменения подхода к освоению месторождений подземным способом в условиях высокой природной газоносности. Представить обзор налоговых нововведений, направленных на стимулирование развития добычи метана из угольных пластов. Изменить скептическое отношение к метану как к углеводородному сырью.

Методы исследования. В процессе исследования применялся метод анализа и обработки статистических и архивных данных объемов добычи угля по способам разработки угольных месторождений. С помощью метода интерпретации произведен сравнительный анализ количества выбросов метана в атмосферу на 1 тонну угля, добытого подземным способом.

Результаты. В результате проведенного анализа выявлено ежегодное увеличение объемов добычи угля в Кузнецком угольном бассейне и изменение конъюнктуры общей добычи угля по способам разработки угольных месторождений. Выявлено увеличение количества выбросов метана в атмосферу на 1 тонну угля при снижении общего объема добычи подземным способом. Установлено, что увеличение относительной газообильности угольных шахт приводит к снижению экономической эффективности подземного способа добычи и увеличению количества выбросов метана в атмосферу. Представлен обзор в части налоговых льгот с целью формирования системного подхода к основным аспектам, влияющим на развитие добычи метана из угольных пластов. На основании выполненного анализа рекомендуется совершенствование подхода к отработке метаноугольных месторождений в направлении поэтапного комплексного освоения с целью разработки эффективных и экономичных способов заблаговременной дегазации месторождений и обеспечения дальнейшей безопасной и высокопроизводительной отработки запасов угля. Данный подход позволит в будущем производить отработку основной части балансовых запасов угля Кузнецкого угольного бассейна, залегающих в зоне высокой природной газоносности, а также двигаться в направлении использования метана в народном хозяйстве.

Ключевые слова:

Метан, природная газоносность, скважина, дегазация, угольный пласт, налогообложение, месторождение, запасы, выбросы метана.

Введение

Угольные пласты как объект накопления метана в земной коре имеют большие перспективы в плане увеличения ресурсов углеводородных газов. В связи с наличием на территории России большого количества угольных месторождений изучение нетрадиционных источников углеводородов было недостаточным. Только в последнее десятилетие наблюдается возрастание интереса к развитию этой отрасли и формированию государственного баланса запасов метана.

Огромные ресурсы, мировой опыт, технологии и имеющееся оборудование для добычи и использования угольного метана позволили бы в ближайшем будущем занять метану достойное место в топливно-энергетическом балансе страны [1]. Метан

может стать ценным полезным ископаемым, подлежащим самостоятельной промысловой добыче или попутному извлечению в шахтах при комплексной поэтапной эксплуатации газоносных угольных месторождений.

Постановка задачи

Освоение запасов каменного угля Кузнецкого угольного бассейна совершенствуется на протяжении многих десятилетий. В настоящее время многие угольные шахты ведут добычу угля на глубине 600–900 м от поверхности земли. С увеличением глубины отработки запасов угля закономерно возрастает и природная газоносность угольных пластов, что приводит к осложнению горно-геологических условий. Современные технологии и методы

дегазации не всегда позволяют достичь желаемой эффективности, в результате чего происходит увеличение концентрации метана в рудничном воздухе, что приводит к взрывам и трагическим последствиям.

Вышеизложенные факты сталкивают между собой две значимые составляющие благополучия работы угольной шахты – безопасность добычи угля и себестоимость товарной продукции. С целью поиска оптимального решения в части активной и безопасной разработки метаноугольных месторождений в данной статье необходимо: представить статистику объемов добычи угля по способам разработки угольных месторождений и провести сравнительный анализ объемов добычи угля подземным способом с количеством выбросов метана в атмосферу; актуализировать проблему изменения подхода к освоению метаноугольных месторождений; сделать обзор внесенных изменений в части налоговых льгот, предоставляемых предприятиям, осуществляющим деятельность по добыче метана из угольных пластов; предложить новые способы комплексного освоения метаноугольных месторождений.

Краткая характеристика объекта

Прогнозные ресурсы метана в основных угольных бассейнах России оцениваются в 83,7 трлн м³, что соответствует примерно трети прогнозных ресурсов природного газа страны. Особое место принадлежит Кузбассу, который по праву можно считать крупнейшим из наиболее изученных метаноугольных бассейнов мира. Прогнозные ресурсы метана в Кузбасском бассейне оцениваются более чем в 13–20 трлн м³ [2].

Данная оценка ресурсов метана в угольных пластах соответствует глубине 1800–2000 м и позволит обеспечить возможность крупномасштабной добычи метана в пределах Кузнецкого бассейна как самостоятельного полезного ископаемого.

Необходимость развития метаноугольных промыслов в Кузбассе обусловлена рядом факторов:

- наличием необходимого количества запасов и ресурсов для добычи;
- наличием зарубежных передовых эффективных технологий промысловой добычи метана из угольных пластов;
- потребностью в реструктуризации угледобывающей отрасли с внедрением заблаговременной дегазации угольных пластов и комплексной поэтапной отработки метаноугольных месторождений.

Методика

Выполнение поставленных задач производилось посредством проведения анализа статистических и архивных данных объемов добычи угля по Кузнецкому угольному бассейну и объемов выбросов метана в атмосферу за 2004–2013 гг. Сделан обзор законодательные акты в части налоговых льгот с целью формирования системного подхода к

основным аспектам, влияющим на развитие добычи метана из угольных пластов и обеспечение безопасной добычи угля.

Сопоставление результатов

Из сообщения администрации Кемеровской области, в Кузбассе до 2025 г. будет ликвидировано 25 угольных шахт и разрезов [3]. Из них 13 предприятий закроются по причине полной отработки запасов, а остальные – по причине нерентабельности. В этом списке в основном шахты Киселевска и Прокопьевска, построенные в 20–40-х гг. прошлого века, имеющие сложные горно-геологические условия. Часть предприятий закрылись еще в 1990-е, но и большинство тех, что ожидают своей очереди, уже фактически не работают. В Кузбассе количество шахт в период с 1996 по 2013 г. сократилось с 86 до 62, при условии введения в действие новых шахт. Основной горно-геологической причиной, повлиявшей на принятие решения о закрытии шахт, является увеличение природной газоносности угольных пластов.

На сегодняшний день угледобывающими предприятиями Кемеровской области добывается 57 % от общей добычи угля в России. В соответствии с требованиями нормативных документов [4] ежегодно устанавливается категория шахты по показателю относительной ее газообильности, которая отражает объем газа, выделившегося в горные выработки за определенный период времени и относительный к количеству угля, добытого за этот же период времени, измеряется в м³/т [5].

Таким образом, в границах Кузнецкого угольного бассейна сложилась следующая ситуация:

- 9 шахт отнесены к I категории, относительная газообильность до 5 м³/т среднесуточной добычи;
- 7 шахт отнесены ко II категории – 5–10 м³/т;
- 11 шахт отнесены к III категории – 10–15 м³/т;
- 21 шахта – сверхкатегорная, т. е. свыше 15 м³/т или с суфлярными выделениями газа;
- 14 шахт являются опасными по внезапным выбросам.

Следует отметить, что относительная газообильность сверхкатегорных шахт в ряде случаев в несколько раз превышает критерий отнесения шахты к сверхкатегорной и составляет 100 и более м³/т. На основании выше изложенного можно утверждать, что более 30 угольных шахт Кузбасса ведут горные работы в сложных горно-геологических условиях по газовому фактору.

С целью обеспечения безопасной добычи угля проводятся дорогостоящие и зачастую малоэффективные мероприятия по дегазации угольных пластов. Данные затраты существенно увеличивают себестоимость продукции угледобывающих предприятий. Несоблюдение требований пылегазового режима приводит к взрывам на угольных шахтах, восстановлению которых является очень затратным и длительным процессом, а также требует решения задач, связанных с производством дегазации при дальнейшей отработке месторождения по

сле восстановления. Поэтому угольные предприятия, на которых не должным образом проводятся данные мероприятия или не представляется возможным произвести дегазацию имеющимися на сегодняшний день технологиями, вынуждены приостанавливать ведение горных работ, консервировать горные выработки или ликвидировать предприятие.

Таблица. Сведения о динамике добычи угля по Кузнецкому бассейну за период 2004–2013 гг.

Table. Data on dynamics of coal production in Kuznetsk coal basin between 2004 and 2013

Год Year	Добыча угля по Кузнецкому бассейну, млн т Coal production in Kuzbass basin, million tonnes	Процент добычи угля по Кузнецкому бассейну Proportion of coal production within Kuzbass basin	
		подземным способом underground mining	открытым способом surface mining
2004	141	45	55
2005	149	44	56
2006	156	44	56
2007	162	44	56
2008	162	41	59
2009	158	45	55
2010	161	40	60
2011	166	37	63
2012	175	37	63
2013	178	35	65

Увеличение себестоимости добычи угля подземным способом в связи с высокой газоносностью неизбежно приводит к сокращению объёма добычи угля подземным способом. В качестве подтвер-

ждения данного факта в таблице представлены сведения о добыче угля в Кузбассе за последние десять лет.

Исходя из данных, представленных в таблице, за последние 10 лет по Кузнецкому угольному бассейну наблюдается увеличение объёмов добычи угля. Общее количество предприятий, ведущих добычу подземным способом, в связи с закрытием нерентабельных шахт существенно не сократилось за счёт открытия новых шахт.

Согласно данным, представленным в таблице, следует отметить увеличение доли добычи угля открытым способом до 65 % от общей добычи по Кузнецкому бассейну. Более наглядно это представлено в виде диаграммы на рис. 1.

Согласно данным, представленным на рис. 1, следует отметить незначительное превышение объёма добычи угля открытым способом в 2004 г. по отношению к объёму добычи подземным способом и стабильное увеличение объёмов добычи угля открытым способом на протяжении последних 4-х лет. Данный факт, конечно, объясним экономическими условиями, но не стоит забывать о подземном способе добычи. Из общего количества балансовых запасов угля по Кузбассу к отработке наиболее экономичным открытым способом пригодны только 20 %, а следовательно, добыча основной части балансовых запасов подлежит все-таки отработке подземным способом, который требует совершенствования.

Для проведения дальнейшего анализа объёмов добычи угля и выбросов метана на рис. 2 представлена информация о количестве выбросов метана в атмосферу за 2004–2014 гг., полученная в Территориальном органе Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области.



Рис. 1. Объём добычи угля открытым и подземным способами за 2004–2013 гг. по Кузнецкому угольному бассейну

Fig. 1. Coal production volume by underground and surface mining methods between 2004 and 2013 in Kuznetsk coal basin

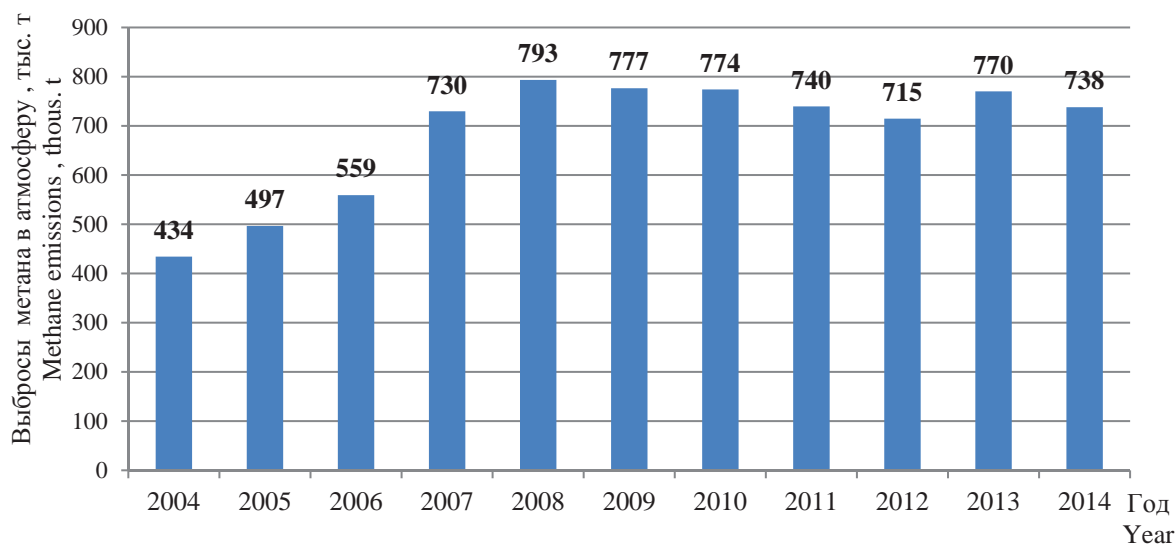


Рис. 2. Сведения о количестве выбросов метана в атмосферу за 2004–2014 гг. по Кузнецкому бассейну

Fig. 2. Data on the amount of methane being emitted into the atmosphere between 2004 and 2014 in Kuznetsk coal basin

Учитывая особенности строения метаноугольных месторождений, добыча угля открытым способом ведется в зоне метановыветривания, в связи с чем на рис. 3 представлен сравнительный анализ объемов добычи угля подземным способом и объемов выбросов метана в атмосферу.

Как видно из рис. 3, увеличение количества выбросов метана в атмосферу наблюдается с 2008 г. и, несмотря на сокращение объемов добычи угля подземным способом. Среднее количество выбросов метана с 1 тонны добытого угля за период 2008–2013 гг. составляет $16,5 \text{ м}^3/\text{т}$. Данный анализ подтверждает нарастание актуальности проблемы увеличения природной газоносности угольных шахт, так как количество выбросов с 1 тонны добытого угля ранее составляло $10\text{--}15 \text{ м}^3/\text{т}$.

Сложившаяся ситуация в последние годы очень активно обсуждается на различных уровнях власти. В 2014 г. Правительством РФ утверждена

Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. [6]. Реализация программы представляет собой три этапа.

Первый этап включает в себя реализацию комплекса программных мер по стабилизации ситуации в отрасли: техническое перевооружение и интенсификацию угольного производства, увеличение объемов обогащения угля, снижение аварийности и травматизма на угледобывающих предприятиях, дальнейшее развитие экспортного потенциала угольных компаний.

Второй этап включает в себя: завершение мероприятий по реструктуризации отрасли, формирование новых центров угледобычи на новых угольных месторождениях с благоприятными горно-геологическими условиями, оснащение организаций угольной промышленности современной высокопроизводительной техникой и технологиями, отвечающими мировым экологическим нормам,

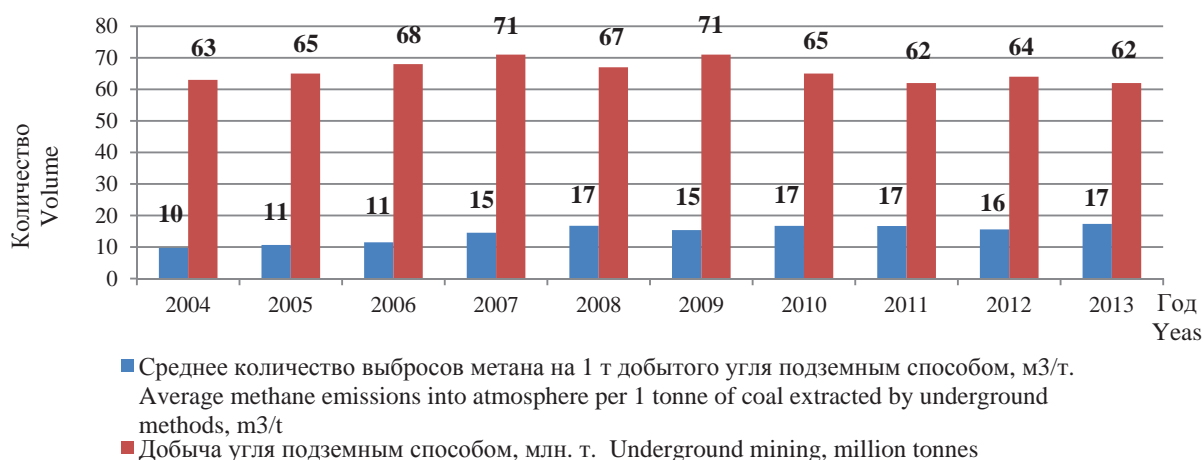


Рис. 3. Сравнительный анализ количества выбросов метана в атмосферу на 1 т угля, добытого подземным способом

Fig. 3. Methane emissions per 1 tonne of coal extracted by underground mining method

снятие системных ограничений при транспортировке угольных грузов на внутренний и внешний рынки, развитие системы аутсорсинга, максимальное использование продуктов переработки каменного энергетического угля на внутреннем рынке, реализацию пилотных проектов на базе технологий глубокой переработки угля.

Третий этап: кардинальное повышение производительности труда при обеспечении мировых стандартов в области промышленной безопасности и охраны труда, экологической безопасности при добыче и обогащении угля; промышленное получение продуктов глубокой переработки угля (синтетическое жидкое топливо, этанол и др.) и сопутствующих ресурсов (метан, подземные воды и строительные материалы).

Целью программы является достижение высокоэффективной рентабельной работы угольных компаний за счет полной модернизации производства, внедрения прогрессивных технологий добычи угля, создания взаимосвязанных технологических комплексов по добыче и преобразованию угля в продукцию с высокой долей добавленной стоимости, а также реализация ранее принятых решений федеральных органов исполнительной власти по осуществлению технических, социальных и экологических мероприятий, связанных с ликвидацией неперспективных шахт и разрезов, обеспечением безопасного проживания населения в районах ликвидированных угольных предприятий.

Мероприятия по совершенствованию нормативно-правовой базы предусматривают:

- совершенствование действующей системы учета запасов угля в части обеспечения ее полного соответствия требованиям международных систем учета запасов;
- субсидирование региональных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, предусматривающих мероприятия по использованию угля в качестве источника энергии на объектах теплоэнергетики в случае их экономической эффективности;
- стимулирование промышленного извлечения метана из угольных месторождений и его использование в экономике страны;
- стимулирование развития глубокой переработки угля (полукоксование, газификация, синтетическое жидкое топливо), в том числе путем предоставления налоговых льгот на срок окупаемости проекта.

Основным ожидаемым результатом реализации Программы является введение новых шахт и разрезов общей мощностью более 50 млн т угля в год на территории Кузнецкого угольного бассейна до 2020 г. Предусматривается создание ряда энерготехнологических кластеров, позволяющих перейти к комплексному освоению ресурсов угольных месторождений, извлечению и использованию метана. Уже выполнены предпроектные разработки и технико-экономические обоснования по формиро-

ванию Караканского, Менчерепского и Серафимовского энерготехнологических кластеров.

Что касается строительства новых шахт, предусмотренных государственной программой развития угледобывающей отрасли, следует отметить, что безопасная отработка запасов угля, залегающих на глубине более 500 м, с природной газоносностью 20–30 м³/т сухой беззольной массы практически невозможна без применения различных видов дегазации. В данной ситуации своевременное производство заблаговременной дегазации и утилизация метана до начала отработки угля подземным способом обеспечит дальнейшую безопасную отработку месторождения и сократит выбросы метана в атмосферу за счёт каптирования.

Согласно данным, представленным на рис. 2, годовые выбросы угледобывающих предприятий за 2004 г. составили 434 тыс. т, а в 2014 г. – 739 тыс. т. В связи с чем можно сделать вывод, что количество выбросов метана в атмосферу за последние 10 лет возросло на 70 %. Данный факт подтверждает актуальность проблемы увеличения газообильности действующих угольных шахт и необходимость совершенствования подхода к отработке метанугольных месторождений.

Норматив платы за выброс 1 т загрязняющих веществ метана в пределах установленных допустимых нормативов выбросов составляет 50 руб., в пределах установленных лимитов выбросов – 250 руб. [7].

Следует отметить, что плата за выбросы метана в атмосферу остаётся неизменной на протяжении более 10 лет. Её снижение, в связи с ростом количества выбросов метана и, как следствие, увеличением себестоимости добычи, не предусматривается. Произведённая плата за выбросы метана не обеспечивает безопасную добычу угля и не исключает простои очистных и проходческих забоев по газовому фактору.

В настоящее время в рамках комплексного освоения месторождений Кузбасса утилизация метана из угольных пластов производится на девяти угольных шахтах: «Талдинская-Западная-1.2», «Котинская», «7 ноября», «Кирова», «Комсомолец», «Польсаевская», «Имени Ленина», «Чертинская-Коксовая», «Шахта № 7» [8]. Добыча и утилизация метана на перечисленных предприятиях ведётся во время работы в очистных или подготовительных забоях, т. е. в процессе добычи угля, и к заблаговременной дегазации не имеет никакого отношения.

Из российского опыта можно отметить работу по производству заблаговременной дегазации угольных пластов на шахте имени Ленина в Карагандинском угольном бассейне, что позволило снизить природную газоносность на 6–9 м³/т. В процессе работ было пробурено более 150 скважин и извлечено более 80 млн м³ метана. Эффективность дегазации составила 50 %. Научное руководство работами осуществлялось специалистами Московского государственного горного университета [9, 10].

Географически сложилось так, что многие районы, в которых находятся угольные бассейны, расположены на значительном расстоянии от месторождений природного газа. Целевым назначением широкомасштабной добычи метана из угольных пластов является полное обеспечение потребностей шахтерских регионов России собственным местным газом, который является наиболее доступным, дешевым и экологически чистым резервом из известных газов, альтернативных природному газу.

Энергетическая ценность метана, в зависимости от концентрации, представляет интерес для отопления жилых помещений, производства электроэнергии, заправки автотранспорта и т. д., а также позволяет сокращать выбросы парникового газа в атмосферу. При обеспечении угольного предприятия теплом и электричеством за счёт каптирования и утилизации метана себестоимость добычи угля сократится до 30 % (в зависимости от доли затрат на электричество).

По большому счёту подход к добыче метана из угольных пластов в разных странах достаточно своеобразен. Существенные изменения в проектировании, разработке и финансировании проектов, выборе оптимальной технологии качества и количества добываемого газа имеются в Германии. Ранее газ из нетронутых пластов в Германии не использовался из-за неблагоприятных условий его извлечения; извлечение метана из действующих шахт диктовалось необходимостью обеспечить безопасность труда шахтеров. На сегодняшний день разработаны технологии добычи и использования метановой смеси из заброшенных шахт [11]. В США с 70-х гг. активно развивается добыча сланцевого газа и метана из угольных пластов с применением гидрорасщепления [12–14].

С целью организации промышленной добычи метана в Кузбассе в 2001 г. была разработана и утверждена Правительством Российской Федерации «Программа добычи углеводородного сырья в Кемеровской области».

Запуск первого в России Талдинского метаноугольного промысла в опытно-промышленную эксплуатацию ООО «Газпром добыча Кузнецк» выполнил в феврале 2010 г. [15]. В то время на площади в 1,66 км² действовало 7 разведочных скважин, дававших 5600 м³ метана в сутки. Сегодня на территории Нарыкско-Осташкинского и Талдинского месторождений площадью 158 км² в пробной и опытно-промышленной эксплуатации находятся 33 скважины, в т. ч. 2 первые в России скважины с горизонтальными участками по угольным пластам. На государственный баланс поставлено 240 млрд м³ геологических запасов угольного метана, из которых 63 млрд м³ планируются к извлечению в течение 25 лет.

Обществом уже добыто из Кузбасских недр почти 40 млн м³ угольного метана, в том числе за 2014 г. – 12 млн м³. Сейчас уровень добычи доведен до 1,2 млн м³ в месяц.

Запасы метана угольных пластов в России впервые были утверждены в мае 2011 г. по Юго-Восточному участку Талдинского метаноугольного месторождения с целью производства на данном месторождении опытно-промышленной добычи метана из угольных пластов.

По результатам опытно-промышленной разработки Талдинского и Нарыкско-Осташкинского участка будет сформирована нормативно-методическая база в части:

- регламентирования объёмов геологического изучения природной газоносности при разведочных работах;
- методики обоснования кондиций для подсчёта геологических и извлекаемых запасов и ресурсов метана;
- инструкций по проектированию заблаговременной дегазации и комплексного освоения метаноугольных месторождений с целью обеспечения рационального использования и охраны недр.

Впервые метан из угольных пластов стали добывать в США в конце 1980-х гг., в настоящее время добыча метана ведётся в Австралии, Канаде и Китае [16].

Опыт зарубежных стран показывает, что масштабная добыча угольного метана в США, Австралии, Китае началась после того, как государства стали стимулировать данные проекты, предоставив значительные налоговые льготы компаниям, занявшимся извлечением метана из угольных пластов.

В России с целью стимулирования развития добычи метана из угольных пластов на разных уровнях власти приняты различные налоговые поступления.

В Кемеровской области Советом народных депутатов принят Закон № 5-ОЗ от 28.01.2010 г. «О налоговых льготах резидентам технопарков и субъектам инвестиционной деятельности, осуществляющим деятельность по добыче природного газа (метана) из угольных месторождений на территории Кемеровской области» [17].

Настоящий Закон на основании Налогового кодекса Российской Федерации устанавливает налоговые льготы и условия их предоставления резидентам технопарков и субъектам инвестиционной деятельности с целью стимулирования развития добычи метана из угольных месторождений на территории Кемеровской области:

- налоговая ставка по налогу на прибыль организаций, подлежащего зачислению в областной бюджет, снижается с 18 до 13,5 %;
- налоговая ставка по налогу на имущество организаций снижается с 2,2 до 0 %.

В связи со сложившейся ситуацией в части обеспечения безопасных условий труда в угольной отрасли, согласно Постановлению от 9 июня 2010 г. № 218 СФ, принимая во внимание исключительную актуальность обеспечения безопасности производственных процессов в угольной от-

сли, Совет Федерации Федерального Собрания Российской Федерации вынес Правительству Российской Федерации в целях создания комплексной системы обеспечения безопасности в угольной отрасли ряд предложений, в том числе рассмотреть возможность предоставления организациям, добывающим газ метан из угольных пластов, налоговых льгот (налоговых каникул), отмены налога на добычу полезных ископаемых и применения нулевой ставки ввозных таможенных пошлин на не имеющее аналогов в Российской Федерации оборудование по дегазации и добыче газа метана [18].

Федеральным законом от 28.12.2010 г. № 425-ФЗ введены изменения в Налоговый кодекс [19]. В соответствии со ст. 325.1 налогоплательщикам предоставлено право на налоговый вычет в виде уменьшения суммы налога на добычу полезного ископаемого (НДПИ) на величину расходов, понесенных в целях обеспечения безопасных условий и охраны труда при добыче угля на участках недр с высоким уровнем метанообильности и склонности угольных пластов к самовозгоранию. Налогоплательщики могут по своему выбору либо использовать указанный налоговый вычет, либо учесть соответствующие расходы при исчислении налоговой базы по налогу на прибыль организаций. Данные изменения действуют с 01.04.2011 г.

Статья 343.1 Налогового кодекса предусматривает изменение порядка уменьшения суммы налога, исчисленного при добыче угля, на расходы, связанные с обеспечением безопасных условий и охраны труда. Налогоплательщики по своему выбору могут уменьшить сумму налога, исчисленную за налоговый период при добыче угля на участке недр, на сумму экономически обоснованных и документально подтвержденных расходов, осуществленных налогоплательщиком с целью обеспечения безопасных условий труда при добыче угля на данном участке недр (налоговый вычет), в порядке, установленном настоящей статьей, либо учесть указанные расходы при исчислении налоговой базы по налогу на прибыль организаций в соответствии с главой 25 Налогового кодекса.

В 2012 г. Федеральным законом от 29.12.2012 г. № 278-ФЗ были внесены изменения в ст. 336 и 337 части второй налогового кодекса Российской Федерации и ст. 6 Федерального закона «О внесении изменений в бюджетный кодекс

Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации» в части признания метана угольных пластов отдельным видом полезного ископаемого. Также, согласно п. 2 ст. 336, метан угольных пластов не признан объектом налогообложения. Внесенные изменения являются существенной поддержкой для развития добычи метана из угольных пластов в промышленных масштабах, а также стимулируют обеспечение безопасной добычи угля за счёт производства различных видов дегазации угольных пластов [20].

Заключение

Таким образом, в результате проведенного анализа были выявлены следующие факты:

- добыча угля в Кузнецком угольном бассейне в целом ежегодно увеличивается;
- на протяжении последних 4-х лет наблюдается увеличение объемов добычи угля открытым способом;
- среднее количество выбросов метана с 1 т добытого угля подземным способом за период с 2004 по 2013 г. увеличилось с 10 до 17 м³/т;
- количество выбросов метана в атмосферу за последние 10 лет возросло на 70 %.
- в связи с увеличением глубины отработки метаноугольных месторождений наблюдается увеличение относительной газообильности угольных шахт, что снижает экономическую эффективность подземного способа добычи.

На основании вышеизложенного можно говорить об актуальности изменения подхода к отработке метаноугольных месторождений в направлении поэтапного комплексного освоения.

В настоящее время необходимым является развитие техники и технологии разведки месторождений в направлении внедрения заблаговременной дегазации угольных пластов.

Со стороны правительства РФ создаются благоприятные условия для развития добычи метана в промышленных масштабах с целью обеспечения безопасной добычи угля. В то же время действующее законодательство не освобождает угледобывающие предприятия от выплат за выбросы метана в атмосферу как источника загрязнения окружающей среды. Такой подход меняет скептическое отношение к метану и стимулирует угледобывающие предприятия двигаться в направлении использования метана в народном хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasyuchkov Yu., Vorobev B., Vasyuchkov K. Unconventional mining technologies for clean and efficient power generation // Mining Engineering. – 1998. – April. – P. 65–69.
2. О перспективах добычи в России угольного газа // ООО «Газпром»: офиц. сайт. URL: <http://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan> (дата обращения: 06.09.2015).
3. Макин М. В Кузбассе будут строиться новые высокопроизводительные предприятия // Стандарт качества. – 2014. – № 37/38. – С. 8–10.
4. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: приказ Ростехнадзора от 19.11.2013 № 550 (ред. от 02.04.2015). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157929/ (дата обращения: 16.09.2015).
5. Об утверждении «Инструкции по дегазации угольных шахт»: приказ Ростехнадзора от 01.12.2011 № 679 (ред. от 20.05.2015). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125844/ (дата обращения: 16.09.2015).
6. Об утверждении программы развития угольной промышленности России на период до 2030 года: распоряжение Правитель-

- ства РФ от 21.06.2014 № 1099-р. URL: <http://lawru.info/dok/2014/06/21/n911.htm> (дата обращения: 16.09.2015).
7. О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления: постановление Правительства РФ от 12.06.2003 № 344 (ред. от 24.12.2014). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42740/ (дата обращения: 16.09.2015).
 8. Доля метана в объеме выбросов на Кузбассе выросла почти в 4 раза // РИА «Новости». – 2013. URL: <http://m.ria.ru/kem/20131212/983666091.html> (дата обращения: 05.02.2015).
 9. Сластунов С.В. Заблаговременная дегазация и добыча метана из угольных месторождений. – М.: Издательство МГГУ, 1996. – 441 с.
 10. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Проблемы реализации концепции метанобезопасности на угольных шахтах России // Уголь. – 2009. – № 1. – С. 28–30.
 11. Willenbrink B. CBM Review: degassing development // World Coal. – 2003. – V. 12. – № 3. – P. 51–54.
 12. Coalbed methane open-hole cavity completion workshop. – Colorado, 1993. April. – 25 p.
 13. Logan T.L., Mavor M.J. Optimizing and evaluation of open-hole cavity completion techniques for coal gas wells // TerraTek. – 1993. – May. – P. 17–21.
 14. Mavor M.J., Robinson J.R. Analysis of coal gas reservoir interference and cavity well tests. – Colorado, 1993. – 60 p.
 15. Губернатор Кемеровской области Аман Тулеев вручил генеральному директору Общества Станиславу Золотых орден Почета Кузбасса // ООО «Газпром добыча Кузнецк»: офиц. сайт. URL: <http://kuznetsk-dobycha.gazprom.ru/press/news/2015/03/51> (дата обращения: 07.09.2015).
 16. Как можно добывать природный газ из угольных пластов // ПАО «Газпром»: офиц. сайт. URL: <http://www.gazprominfo.ru/articles/methane-from-coal> (дата обращения: 07.09.2015).
 17. О налоговых льготах резидентам технопарков и субъектам инвестиционной деятельности, осуществляющим деятельность по добыче природного газа (метана) из угольных месторождений на территории Кемеровской области: закон Кемеровской области от 28.01.2010 № 5-ОЗ: принят Советом народных депутатов Кемеровской области 27.01.2010. – Док. опубл. «Законодательный вестник Совета народных депутатов Кемеровской области» № 94 01.02.2010. URL: <http://www.gosbook.ru/node/67978> (дата обращения: 07.09.2015).
 18. О законодательном обеспечении безопасных условий труда в угольной отрасли: постановление СФ ФС РФ от 09.06.2010 № 218-СФ. – Док. опубл. «Собрание законодательства РФ» 14.06.2010 № 24 ст. 2958. URL: <http://www.lawmix.ru/expertlaw/12757> (дата обращения: 07.09.2015).
 19. О внесении изменений в главы 25 и 26 части второй Налогового кодекса Российской Федерации: федеральный закон от 28.12.2010 № 425-ФЗ. – Док. опубл. «Собрание законодательства РФ» 03.01.2011 № 1 ст. 37. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=LAW; n=108786> (дата обращения: 07.09.2015).
 20. О внесении изменений в статьи 336 и 337 части второй Налогового кодекса Российской Федерации и статью 6 Федерального закона «О внесении изменений в Бюджетный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации»: федеральный закон от 29.12.2012 № 278-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140073/ (дата обращения: 07.09.2015).

Поступила 09.11.2015.

UDC 622.333:622.324:658:336.221

TRENDS IN COAL MINING LAWS AND TAXATION AIMED AT STIMULATING COMMERCIAL COAL SEAM METHANE PRODUCTION

Elena A. Shubina,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Lena_shubina@mail.ru

Viktor G. Lukyanov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lev@tpu.ru

The relevance of the research is due to the fact that there is an urgent need for the integrated approach that would allow development of coal methane resources including commercial production of coal seam methane.

The goal of the research is to analyze the current state of mining industry in Kuzbass region and examine the amount of coal extracted by various mining methods. The study is also aimed at examination of the volume of methane released into the atmosphere from coal mines. It emphasizes the necessity to modernize the underground mining method by introducing pre-mine drainage in the mines with high gas content. In addition, the current research is planned to present new trends in coal mining taxation aimed at stimulating commercial production of coal seam methane. Finally, it is intended to overcome skepticism towards methane as a hydrocarbon resource.

The methods of the research. The research involves the analysis and processing of statistical and archival data on the amount of coal extracted by various mining methods. Based on the interpretation method, the comparative analysis of methane emissions into the atmosphere per 1 tonne of coal extracted by underground mining has been conducted.

The results. The analysis has shown annual increase in the amount of coal mined within the Kuzbass coal basin and transformation of coal mining market environment according to mining methods. The growth of methane emissions into the atmosphere per 1 tonne of coal has been revealed while the amount of coal extracted by underground mining method has declined. It has been identified that increase in relative gas content of coal mines decreases the cost efficiency of underground mining method and contributes to methane re-

lease into the atmosphere. The tax allowances have been analyzed in order to develop the integrated approach to the basic issues that influence coal seam methane production. Based on the analysis results, it is recommended to improve the procedures of coal methane resources development by introducing interconnected stages which would allow conducting efficient and cost-effective pre-mine drainage and ensuring further safety and high quality of mining operations. The proposed approach will allow mining most of profitable coal reserves within the Kuzbass coal basin and contribute to commercial production of coal methane and its use in the national economy.

Key words:

Methane, natural gas-bearing, well, degassing, coal seam, taxation, field, reserves, emissions of methane.

REFERENCES

1. Vasyuchkov Yu., Vorobev B., Vasyuchkov K. Unconventional mining technologies for clean and efficient power generation. *Mining Engineering*, 1998, April, pp. 65–69.
2. O perspektivakh dobychi v Rossii ugolnogo gaza [On perspectives of coal gas production in Russia]. *Gazprom*. Available at: <http://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan/> (accessed 6 September 2015).
3. Makin M. V Kuzbasse budut stroitsya novye vysokoproizvoditelnye predpriyatiya [New high-efficient enterprises will be built in Kuzbass]. *Standart kachestva*, 2014, no. 37/38, pp. 8–10.
4. Ob utverzhdenii Federalnykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh». *Prikaz Rostekhnadzora ot 19.11.2013 № 550* [On approval of Federal norms and rules in the field of industrial safety «Safety rules in coal mines». Approved on 19 November 2013, no. 550]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157929/ (accessed 16 September 2015).
5. Ob utverzhdenii «Instruksii po degazatsii ugolnykh shakht». *Prikaz Rostekhnadzora ot 01.12.2011 № 679* [On approval of «Guidance on Coal Mine Drainage». Approved on 1 December 2011, no. 679]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125844/ (accessed 16 September 2015).
6. Ob utverzhdenii programmy razvitiya ugolnoy promyshlennosti Rossii na period do 2030 goda: rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 21.06.2014 № 1099-p [On approval of the program of coal mining industry development in Russia up to 2030. Approved on 21 June 2014, no. 1099-p]. Available at: <http://lawru.info/dok/2014/06/21/n911.htm> (accessed 16 September 2015).
7. O normativakh platy za vybrosy v atmosferynyy vozdukh zagryaznyayushchikh veshchestv stacionarnymi i peredvizhnymi istochnikami, sbrosy zagryaznyayushchikh veshchestv v po-verkhnostnye i podzemnye vodnye obekty, v tom chisle cherez tsentralizovannyye sistemy vodootvedeniya, razmeshchenie otkhodov proizvodstva i potrebleniya: postanovlenie Pravitelstva RF ot 12.06.2003, no. 344 [The fee rate on the emissions of pollutants into the atmosphere by stationary and mobile units, disposal of pollutants into surface and ground water bodies through the centralized water disposal systems, dumping of production and consumption wastes]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42740/ (accessed 16 September 2015).
8. Dolya metana v obeme vybrosov na Kuzbasse vyrosla pochni v 4 raza [The share of methane in total emissions in Kuzbass has increased by almost 4-fold]. *RIA NOVOSTI*, 2013. Available at: <http://m.ria.ru/kem/20131212/983666091.html> (accessed 5 February 2015).
9. Slastunov S.V. *Zablagovremennaya degazatsiya i dobycha metana iz ugolnykh mestorozhdeniy* [Pre-mine drainage and coal seam methane production]. Moscow, MGGU Press, 1996. 441 p.
10. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kolikov K.S. Problemy realizatsii kontseptsii metanobezopasnosti na ugolnykh shakhtakh Rossii [The problems related to methane safety program implementation in coal mines of Russia]. *Ugol*, 2009, no. 1, pp. 28–30.
11. Willenbrink B. CBM Review: degassing development. *World Coal*, 2003, vol. 12, no. 3, pp. 51–54.
12. *Coalbed methane open-hole cavity completion workshop*. Colorado, 1993, April. 25 p.
13. Logan T.L., Mavor M.J. Optimizing and evaluation of open-hole cavity completion techniques for coal gas wells. *TerraTek*, 1993, May, pp. 17–21.
14. Mavor M.J., Robinson J.R. *Analysis of coal gas reservoir interference and cavity well tests*. Colorado, 1993. 60 p.
15. Gubernator Kemerovskoy oblasti Aman Tuleev vruchil generalnomu direktoru Obshchestva Stanislavu Zolotykh orden Pocheta Kuzbassa [The governor of Kemerovo region, Aman Tuleev awarded Stanislav Zolotykh, General Director of the Society, with the Order of Honor of Kuzbass]. *Gazprom dobycha Kuznetsk*, 2015. Available at: <http://kuznetsk-dobycha.gazprom.ru/press/news/2015/03/51> (accessed 7 September 2015).
16. Kak mozno dobyvat prirodnyy gaz iz ugolnykh plastov [How coal seam gas is produced]. *Gazprom*. Available at: <http://www.gazprominfo.ru/articles/methane-from-coal> (accessed 7 September 2015).
17. O nalogovykh lgotakh rezidentam tekhnoparkov i subektam investitsionnoy deyatel'nosti, osushchestvlyayushchim deyatel'nost po dobyche prirodnogo gaza (metana) iz ugolnykh mestorozhdeniy na territorii Kemerovskoy oblasti: zakon Kemerovskoy oblasti ot 28.01.2010 № 5-OZ [On tax benefits to residents of industrial clusters and investment activity entities engaged in activities for the extraction of natural gas (methane) of coal deposits in Kemerovo region. Approved on 27 January 2010]. Available at: <http://www.gosbook.ru/node/67978> (accessed 7 September 2015).
18. O zakonodatel'nom obespechenii bezopasnykh usloviy truda v ugolnoy otrasli: postanovlenie SF FS RF ot 09.06.2010 № 218-CФ [On the legislative provision of safe working conditions in the coal industry. Approved on 9 June 2010, no. 218-CФ]. Available at: <http://www.lawmix.ru/expertlaw/12757> (accessed 7 September 2015).
19. O vnesenii izmeneniy v glavy 25 i 26 chasti vtoroy Nalogovogo kodeksa Rossiyskoy Federatsii: federalnyy zakon ot 28.12.2010 № 425-Ф3 [On Amendments to Chapters 25 and 26 of the Tax Code of the Russian Federation. Approved on 28 December 2010, no. 425-Ф3]. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=LAW; n=108786> (accessed 7 September 2015).
20. O vnesenii izmeneniy v stati 336 i 337 chasti vtoroy Nalogovogo kodeksa Rossiyskoy Federatsii i statyu 6 Federal'nogo zakona «O vnesenii izmeneniy v Byudzhetyy kodeks Rossiyskoy Federatsii i otdelnye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii»: federalnyy zakon ot 29.12.2012 № 278-Ф3 [On Amendments to Articles 336 and 337 of the Tax Code of the Russian Federation. Approved on 29 December 2012, no. 278-Ф3]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140073/ (accessed 7 September 2015).

Received: 9 November 2015.

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*


Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати хх.12.2015. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,281. Уч.-изд. л. 14,73.
Заказ ххх-15. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru