

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



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 326, № 1, 2015

Ресурсы Планеты

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. наук (Россия)
Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А. С., выпуск. редактор, канд. техн. 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)

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

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2015

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета» (Известия ТПУ) – 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 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

«Известия Томского политехнического университета» 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 других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия ТПУ»:

- 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 «Известия ТПУ» 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 1684-8519

BULLETIN

OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Volume 326, № 1, 2015

The Planet Resources

TPU  PUBLISHING

Tomsk

BULLETIN OF TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Editorial Board

Dyachenko A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, 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., Cand. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
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)

© Tomsk Polytechnic University, 2015

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University (TPU Bulletin) is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University. The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 1684-8519) 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 other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of Tomsk Polytechnic University" 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.

TPU Bulletin 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.

The Bulletin of the Tomsk Polytechnic University 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

Планетарная трещиноватость и процессы разработки залежей углеводородов Белозёров В.Б.	6	Planar fracturing and development of petroleum reservoirs Belozerov V.B.
Нефтегазоносность нижнемеловых резервуаров Нюрольской мегавпадины Осипова Е.Н., Лобова Г.А., Исаев В.И., Старостенко В.И.	14	Petroleum potential of the lower cretaceous reservoirs of Nyuro'l'ka megadepression Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I.
Карбонаты кальция в голелитах Машина Е.В., Макеев Б.А., Филиппов В.Н.	34	Calcium carbonates in gallstones Mashina E.V., Makeev B.A., Filippov V.N.
Талажинский и Аргысуцкий массивы: общность петролого-геохимических черт (северо-запад Восточного Саяна) Юричев А.Н., Чернышов А.И.	40	Talazhinsky and Argysuksky complexes: petrologo-geochemistry common traits (Northwest of Eastern Sayan) Yurichev A.N., Chernyshov A.I.
Минералого-геохимические особенности баженовской свиты Западной Сибири по данным ядерно-физических и электронно-микроскопических методов исследований Рихванов Л.П., Усольцев Д.Г., Ильенко С.С., Ежова А.В.	50	Mineralogical and geochemical features of the Bazhenov formation, West Siberia, according to nuclear-physics and electron-microscopic methods of research Rikhanov L.P., Usoltsev D.G., Ilenok S.S., Ezhova A.V.
Связи между микроэлементным составом донных отложений и процессами осадконакопления в дельте реки Меконг (Вьетнам) Савичев О.Г., Фунг Тхай Зьонг	64	Relations between microelement composition of bed load sediments and sedimentation in delta of the Mekong river (Vietnam) Savichev O.G., Duong Phung Thai
Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Ч. 2. Месторождение Зун-Холба (Восточный Саян) Кучеренко И.В.	73	Petrology of hydrothermal metasomatism into intra-ore dolerite dikes of mesothermal gold deposits. P. 2. Zun-Kholba (East Sayan) Kucherenko I.V.
Перспективы Каскырказган-Каратасской зоны на выявление медно-порфировых, полиметаллических, железорудных и золоторудных месторождений (Центральный Казахстан) Акылбеков С.А., Жуков М.И., Мазуров А.К.	87	Kaskyrkazgan-Karatassk zone prospects in identifying copper-porphyry, polymetallic iron and gold ore deposits (central Kazakhstan) Akylbekov S.A., Zhukov M.I., Mazurov A.K.
Анализ горно-геологических условий бурения глубоких скважин на Талнахском рудном узле Нескоромных В.В., Неверов А.Л., Рожков В.П., Каратаев Д.Д., Неверов А.А.	100	Analysis of mining and geological conditions of a long borehole drilling on Talnakh ore cluster Neskoromnykh V.V., Neverov A.L., Rozhkov V.P., Karataev D.D., Neverov A.A.
Адаптивная интерпретация газодинамических исследований скважин с идентификацией начального участка кривой восстановления давления Романова Е.В., Сергеев В.Л.	111	Adaptive interpretation of gas-dynamic research of wells identifying the initial area of a pressure recovery curve Romanova V.E., Sergeev V.L.
Прогноз коллекторов в разрезе баженовской свиты по материалам керна и геофизических исследований скважин Куляпин П.С., Соколова Т.Ф.	118	Reservoir identification in the Bazhenov Formation from Well Log and Core Data Kulyapin P.S., Sokolova T.F.
Анализ спектров высокого разрешения молекулы фторметана в диапазоне 2400–2800 см ⁻¹ Болотова И.Б.	134	Analysis of the high-resolution spectra of methyl fluoride in the region of 2400–2800 cm ⁻¹ Bolotova I.B.
Численное моделирование соударения длинных стержней со слоисто-разнесенными преградами Герасимов А.В.	139	Numerical simulation of long rods collision with layered-spaced barriers Gerasimov A.V.
Определение температурных полей и температурного условия адгезии в модели «капля расплава – подложка» Колесникова Е.А.	146	Determination of thermal fields and adhesion temperature conditions in the model «liquid-alloy droplet – substrate» Kolesnikova E.A.
Методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Симонян С.О.	157	Methods for determining complex one-parametric generalized inverse matrices Simonyan S.H.

УДК 662.276:552.578.2.061.43

ПЛАНЕТАРНАЯ ТРЕЩИНОВАТОСТЬ И ПРОЦЕССЫ РАЗРАБОТКИ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Белозёров Владимир Борисович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры проектирования объектов нефтегазового комплекса Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: BelozerovVB@hw.tpu.ru

Актуальность работы связана с проблемой повышения эффективности разработки залежей нефти и газа в низкопроницаемых терригенных коллекторах и сланцевых толщах.

Цель работы: обоснование использования планетарной трещиноватости горных пород для повышения эффективности эксплуатации залежей нефти и газа в низкопроницаемых терригенных коллекторах и сланцевых толщах. В основе исследований – сопоставление существующих теоретических разработок по планетарной трещиноватости с конкретным фактическим материалом по нефтегазовой геологии, литологии и сейсморазведке верхнеюрских и нижнемеловых отложений Западной Сибири.

Методы исследований: выделение планетарной системы трещиноватости по данным сейсморазведки (метод Прони), изучение трещиноватости ориентированного керна, литолого-петрографические исследования зон напряжённости горных пород, анализ эксплуатационных возможностей коллектора в прогнозных зонах планетарной трещиноватости.

Результаты. Выполнен анализ разработки залежи нефти пласта Ю² Игольского месторождения. Показана связь повышенных дебитов с зонами напряжённого состояния горных пород, выделенных по данным сейсморазведки. Проведено сопоставление зон напряжённости с ориентировкой системы планетарной трещиноватости для верхнеюрских отложений Западной Сибири. По данным литологических исследований показана связь трещиноватости с интервалами повышенной глинистости коллектора; сопоставлены ориентации выделяемого глобального поля напряжений для отложений девона-карбона Северо-Американского континента и поля распределения микросейсмических исследований, полученных при гидроразрыве нижнекарбоновой сланцевой толщи Barnett. Показано, что выделяемая область сейсмической активности сформирована многочисленными участками микросейсм северо-восточной и северо-западной ориентировки, которые соответствуют прогнозируемым направлениям глобальных напряжений ротационного поля рассматриваемого стратиграфического горизонта данного района по литературным источникам.

Ключевые слова:

Планетарная трещиноватость, сейсмический разрез, технологическая схема разработки, нефтегазоносный коллектор, зоны напряжённости горных пород.

Введение

Эффективность разработки залежей углеводородов в низкопроницаемых коллекторах базируется как на внедрении новых технологий нефтедобычи, так и на использовании природных особенностей строения коллектора, связанных с условиями его формирования и последующего преобразования в породу. С позиции особенностей эксплуатации залежей нефти и газа особый интерес представляют зоны планетарной трещиноватости горных пород. Эти зоны имеют определённые закономерности пространственного развития в различных стратиграфических горизонтах платформенных областей и могут быть выделены и прослежены данными сейсморазведки.

Теоретические и практические предпосылки

В соответствии с генетической классификацией [1] выделяются петрогенетические (литологические, контракционные), тектонические и экзогенные трещины. Наиболее интересны с позиции разработки залежей углеводородов планетарные или общие трещины, выделяемые в группе тектонических.

Общие (планетарные) трещины обладают следующими особенностями [2, 3]:

- развиты как в дислоцированных, так и в горизонтально залегающих породах на платформах и в складчатых областях;

- в каждой земной точке поверхности образуют две взаимно перпендикулярные системы, ориентировка которых меняется как по площади, так и в разрезе;
- системы планетарных трещин прослеживаются в осадочном чехле платформ от докембрия до третичных отложений;
- общие трещины не приурочены к каким-либо тектоническим структурам.

Механизм образования этих трещин до конца не ясен, однако ряд исследователей [3 и др.] проявление планетарной (эндокинетической) трещиноватости связывают с реализацией в разрывные нарушения тех напряжений, которые возникают в осадке в результате действия ротационного поля вращения Земли. Проявление эндокинетической трещиноватости объясняется авторами [3] следующим образом. В стадии сингенеза осадочный материал воспринимает напряжения, обусловленные ротационным полем вращения Земли. Это поле формирует ортогональную линейную систему повышенных механических напряжений, которая «вмораживается» в осадочный покров. Пространственное положение этой ортогональной системы имеет чёткую ориентировку и связано с палеогеографическим полюсом вращения Земли.

Поэтому для различных стратиграфических уровней направленность линейных зон напряжённости будет строго определённой. В процессе седи-

ментации, когда осадок ещё насыщен водой и пластичен, существующие напряжения не приводят к нарушению монолитности породы. Однако при потере воды в процессе литификации и уплотнения породы отложения становятся более хрупкими и существующие напряжения уже не могут компенсироваться пластичностью осадка. Порода растрескивается или находитесь в критически напряжённом состоянии. Вследствие этого изучение ориентированной трещиноватости особо информативно, так как помимо относительной величины напряжений она несёт информацию о направлениях, по которым эти напряжения были приложены. На платформах, где тектонические деформации осадочного чехла слабо выражены, проявление эндокинетической трещиноватости должно быть преобладающим, а выделенные зоны её проявления могут быть использованы в процессах разработки залежей углеводородов.

Полученные результаты и практические выводы

По результатам проведённых исследований [4] роза трещиноватости пород юры и неокома юго-восточной части Западно-Сибирской плиты (ЗСП) имеет вид, изображённый на рис. 1, А.

Сравнивая выделяемые системы трещин с реконструкцией ротационного поля вращения Азии [5, 6], можно отметить соответствие азимутов трещиноватости 295 и 25 град. ротационному полю юры и апт-сеномана, азимутов – 335 и 65 град. – нижнему и верхнему мелу, а азимутов – 270 и 0 град. – неоген-четвертичному периоду (рис. 1, Б). Интересные результаты получены и при анализе сейсмических данных, где на временных разрезах, после специальной обработки по методу «Прони», отмечаются «столбы» отсутствия отражённых волн при реально существующей акустической дифференциации разреза (рис. 1, Д).

Один из возможных вариантов объяснения этого – наличие напряжённых зон в осадочном чехле, нивелирующих плотностную и скоростную неоднородность осадочной среды. О связи этих зон с ротационным полем можно судить по их пространственной ориентации.

Анализ временных разрезов 2D и 3D на Игольской и Комсомольской площадях, (рис. 1, Г) свидетельствует о том, что ортогональные элементы «затухания» сейсмической записи для верхнеюрских отложений Игольской площади имеют азимут простирания 295 и 25 град., а для отложений нижнего мела Комсомольской площади близки к 335 и 65 град [7, 8].

Это соответствует расчётным для Западной Сибири азимутам напряжённости ротационного поля юры и нижнего мела (рис. 1, Б). Подтверждаются зоны напряжённости (планетарной трещиноватости) и данными бурения. Так, макро- и микроскопический анализ продуктивных песчаников верхней юры, отобранных из этих зон на Игольской площади, свидетельствует о прерывистой, «слепой» трещиноватости, приуроченной к прослоям

песчаников, обогащённых глинистым материалом. Осуществляя проводку скважины в пределах этих зон, мы нарушаем сложившееся геостатическое равновесие и формируем свободное пространство, в результате чего по периферии ствола скважины ранее существовавшая напряжённость горных пород реализуется в прерывистую (эндокинетическую) трещиноватость.

Последующая разработка залежи углеводородов, влияющая на геодинамические характеристики пласта, может приводить к проявлению трещиноватости в межскважинном пространстве, поэтому выделяемые зоны напряжённости могут являться эффективным инструментом для оптимизации эксплуатации месторождений углеводородов и интересным «объектом» для проведения гидро разрыва в пласте. Учитывая, что при наличии напряжённых зон в осадочной породе для формирования трещин необходимо свободное поровое пространство, последнее может формироваться в результате отработки флюида в процессе эксплуатации. Извлечение нефти из поровой среды способствует раскрытию напряжённых зон и образованию трещинной матрицы.

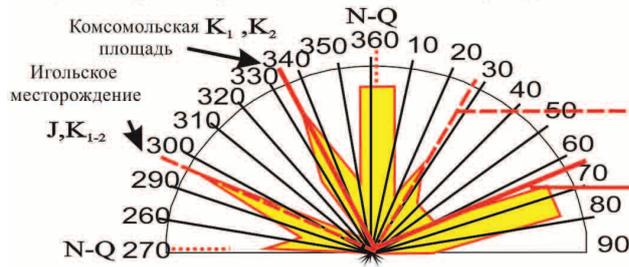
Анализ розы-диаграммы позволяет сгруппировать её лучи в три ортогональных системы азимутов: 335 и 65, 295 и 25, 270 и 0 градусов. Само выделение ортогональных систем трещин даёт основание предполагать, что их формирование обусловлено ротационным полем вращения Земли [3].

Анализ разработки пласта Ю₁² Игольского месторождения (рис. 1, Д) показал тесную связь повышенных дебитов нефти с выделенными зонами динамической напряжённости по данным сейсморазведки. Скважины, пробуренные в пределах трендов напряжённости горных пород, на этапе несформированной системы внутриконтурного заводнения имеют более высокую продуктивность. Из сопоставления карты эффективных толщин пласта Ю₁² (рис. 2) с картой среднесуточных дебитов (рис. 1, Д) следует, что трендам напряжённости соответствуют средние и пониженные значения эффективных толщин песчаника.

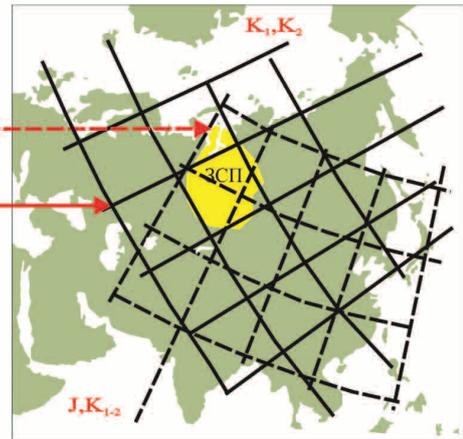
Рассматривая величину притока как произведение работающей толщины коллектора на его проницаемость, повышенные дебиты нефти можно связывать с более высокой фильтрационной характеристикой продуктивного пласта, обусловленной его трещиноватостью.

Не противоречат этому и исследования керна скважин. Так, избирательная послойная трещиноватость в кернах характерна для скважин 1107, 375, 13Р, расположенных вблизи выделяемых трендов напряжённости (рис. 1, Д). Исследования в шлифах, выполненные в скважине 1107 [9], показали, что интервалы послойной трещиноватости приурочены к участкам повышенной глинизации (каолинизации) разреза (рис. 3, А). Зависимость пористости и проницаемости для этих интервалов характеризуется более высокими значениями проницаемости, а анализ построенных графиков с учё-

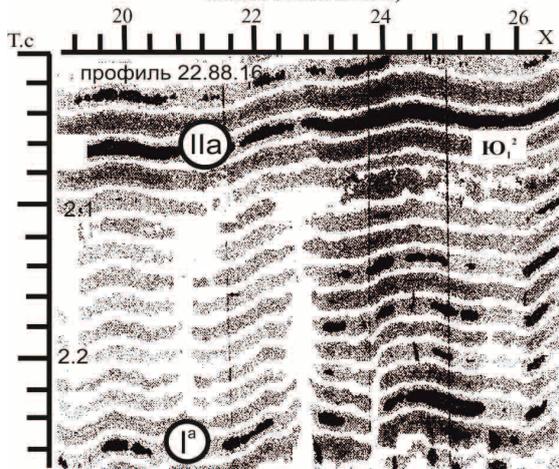
А. Ориентировка простирания трещиноватости в породах юры и неокома Каймысовского свода (по данным К.И. Микуленко) и связь трендов трещиноватости с эндокинетической (планетарной) трещиноватостью (по С.С. Шульцу)



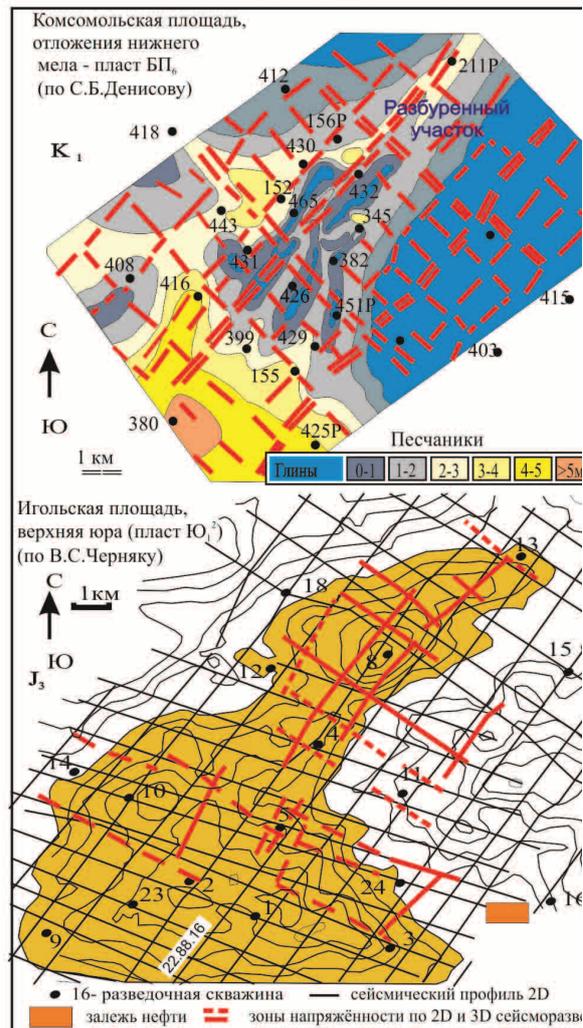
Б. Отпечатки и возраст глобального ротационного поля напряжений (эндокинетическая трещиноватость) на территории Евразии (по В.Д. Долицкому).



В. Выделение зон напряжённости в разрезе осадочного чехла по данным сейсморазведки ("столбы" потери сейсмической записи)



Г. Пространственная трассировка динамически напряжённых зон по данным 3D и 2D сейсморазведки Комсомольской и Игольской площадей.



Д. Связь величины среднесуточных дебитов нефти с динамически напряжёнными зонами пласта Ю₁² в пределах Игольского месторождения.

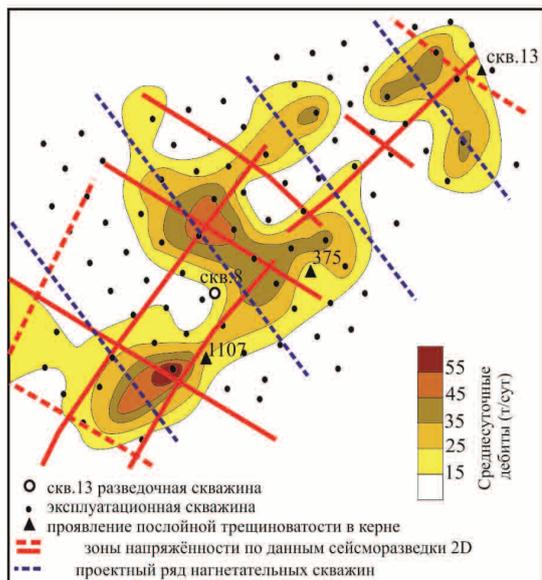
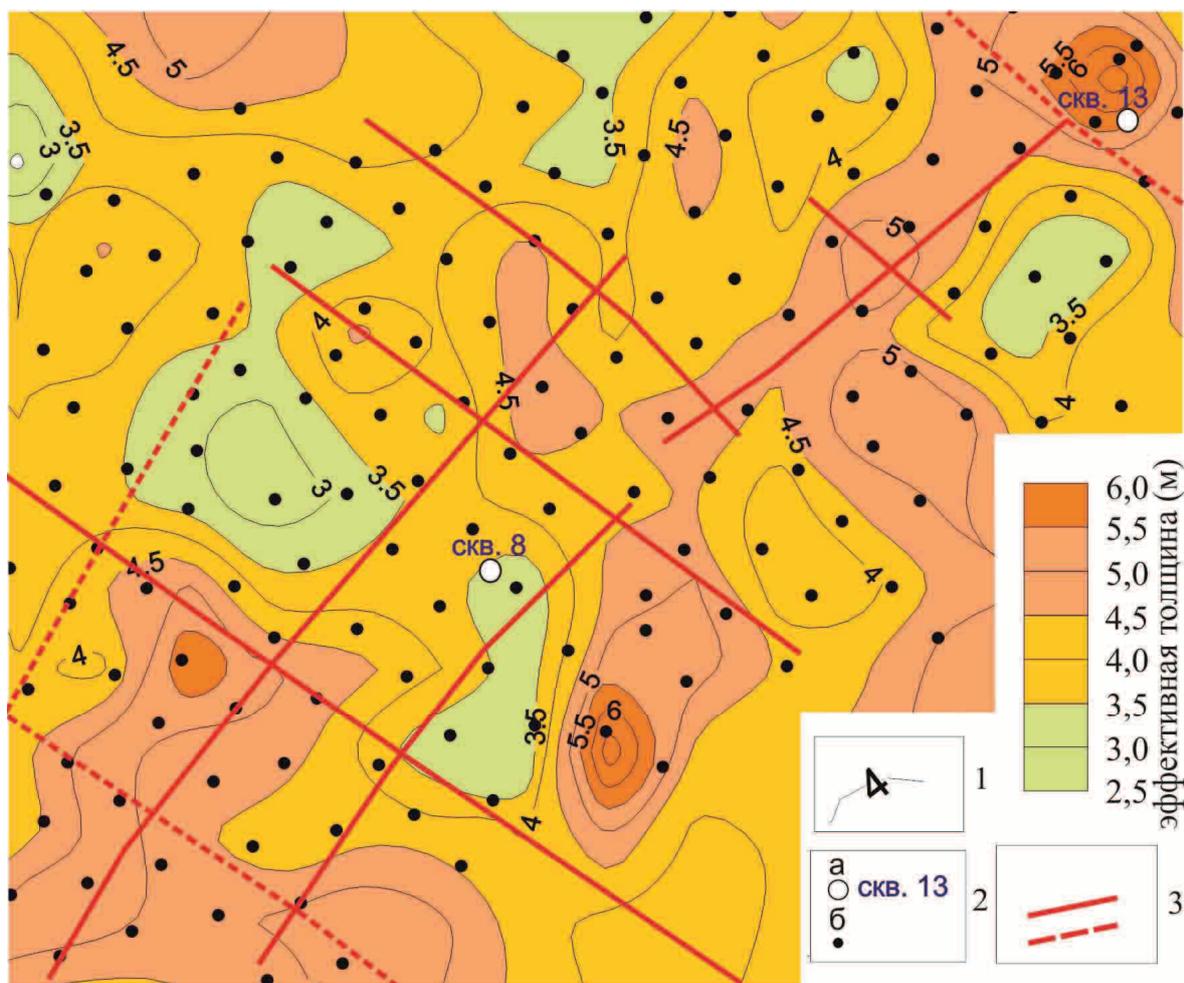


Рис. 1. Выделение зон напряжённости (планетарной трещиноватости) в отложениях осадочного чехла и особенности разработки залежей углеводородов

Fig. 1. Selection of intensity regions (planar fracturing) in sedimentary cover deposits and features of developing hydrocarbon deposits



1-разведочные (а) и эксплуатационные (б) скважины; 2-изопахиты эффективных толщин пласта J_1^2 ; 3- тренды напряжённости горных пород по данным сейсморазведки.

Рис. 2. Карта эффективных толщин пласта J_1^2 Игольского месторождения

Fig. 2. Map of the effective depths of J_1^2 layer of Igolskoe deposit

том литологической неоднородности коллектора существенно повышает коэффициенты корреляции относительно графика общей зависимости (рис. 3, Б).

Как следует из рисунка 3, Б, в результате проявления послойной трещиноватости и формирования сложного типа коллектора [10] в разработку могут быть вовлечены низкопоровые части пласта, что может существенно повысить эффективность эксплуатации залежи нефти. В соответствии с конфигурацией кривой самопроизвольной поляризации (ПС), отражающей фильтрационную неоднородность коллектора (рис. 3, А), его проницаемость снижается от кровли к подошве пласта, что связано с увеличением доли глинистой фракции в составе обломочного материала.

Анализ распределения интервалов притока-приёмности в пределах зон перфорации продуктивного коллектора на «зрелой» стадии разработки месторождения (рис. 4) свидетельствует о наличии

трендов северо-восточной ориентировки, где интервалы притока-приёмности флюида фиксируются в подошвенной части пласта. Это указывает на присутствие трещинной проницаемости в глинистой низкопоровой части разреза коллектора.

Пространственная ориентировка выделенных зон хорошо согласуется с направлением планетарной напряжённости, определённой для отложений юры Западной Сибири (рис. 1, Б). Проявление в основном северо-восточного тренда напряжённости можно объяснить влиянием фонда нагнетательных скважин. На месторождении реализована рядная система поддержания пластового давления (ППД). Северо-западная ориентировка нагнетательных рядов скважин (рис. 1, Е) благоприятна для дренирования напряжённых зон северо-восточного направления. Более значительное их количество, относительно выделяемых зон напряжённости по данным 2D сейсморазведки, вероятно связано с несовершенством метода 2D съёмки.

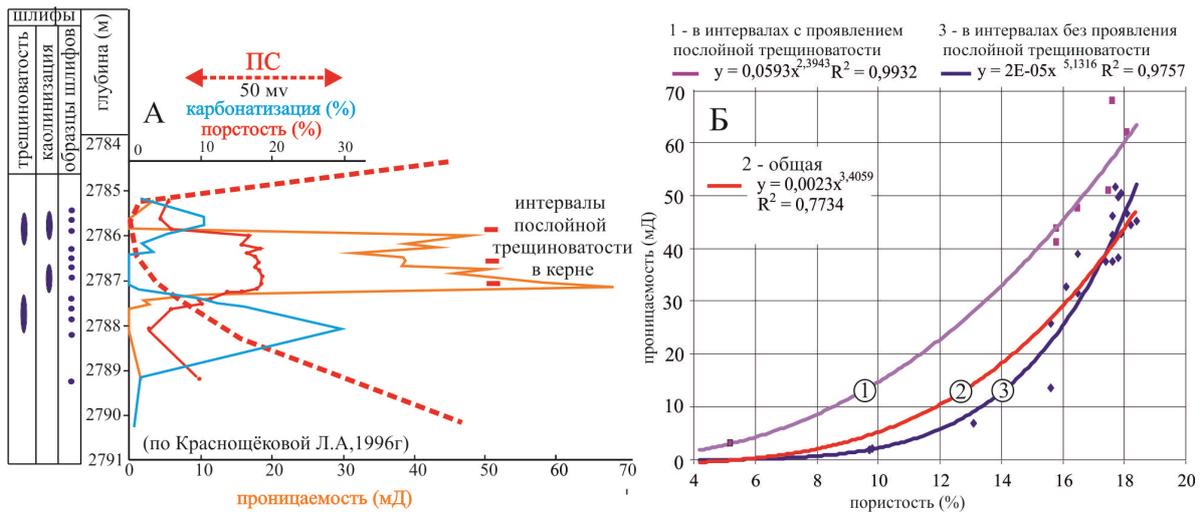


Рис. 3. Литолого-петрофизическая характеристика пласта Ю₂ в скважине 1107 Игольской площади

Fig. 3. Lithological and petrophysical characteristic of J₂ layer in 1107 well of Igolskaya ground

Широкое развитие ортогональных трендов планетарной напряжённости в отложениях платформенного чехла [11, 12] и их закономерное пространственное расположение в объёме определённых

стратиграфических уровней позволяют использовать общую (планетарную) трещиноватость при формировании технологических схем разработки залежей нефти и газа.



Рис. 4. Распределение интервалов притока-приёмности по разрезу продуктивного пласта Ю₂ на «зрелой» стадии разработки залежи нефти Игольского месторождения

Fig. 4. Distribution of inflow-injectivity intervals along the section of productive formation J₂ at the «ephebic» stage of oil reservoir development in Igolskoe deposit

Учитывая тот факт, что планетарные трещины лучше выражены в плотных, менее проницаемых породах [1], выявленные тренды напряженности позволяют более эффективно разрабатывать залежи нефти и газа в низкопроницаемых коллекторах, приуроченных к определённым обстановкам осадконакопления [13].

Как показывают исследования [1, 3], планетарная трещиноватость не является «сквозной». Она локализуется в пределах однородных по литологическому составу слоёв. Трещины вертикально ориентированы относительно напластования, а их пространственное распределение имеет линейную зависимость от толщины слоя [1, 3]. Вследствие этого можно прогнозировать пространственную

матрицу распределения трещин по выделяемым слоям литологической неоднородности изучаемой осадочной толщи и учитывать её в гидродинамических моделях залежей углеводородов.

Общепризнанный факт наличия планетарной трещиноватости в осадочных отложениях различных нефтегазоносных провинций позволяет использовать существующие теоретические и практические исследования по данному вопросу в новых технологиях разработки залежей нефти и газа (гидроразрыв пласта, бурение горизонтальных скважин). Особого практического интереса заслуживает вопрос разработки «сланцевой» нефти, где от трещиноватости глинистых сланцев зависит как величина дебитов углеводородов, так и про-

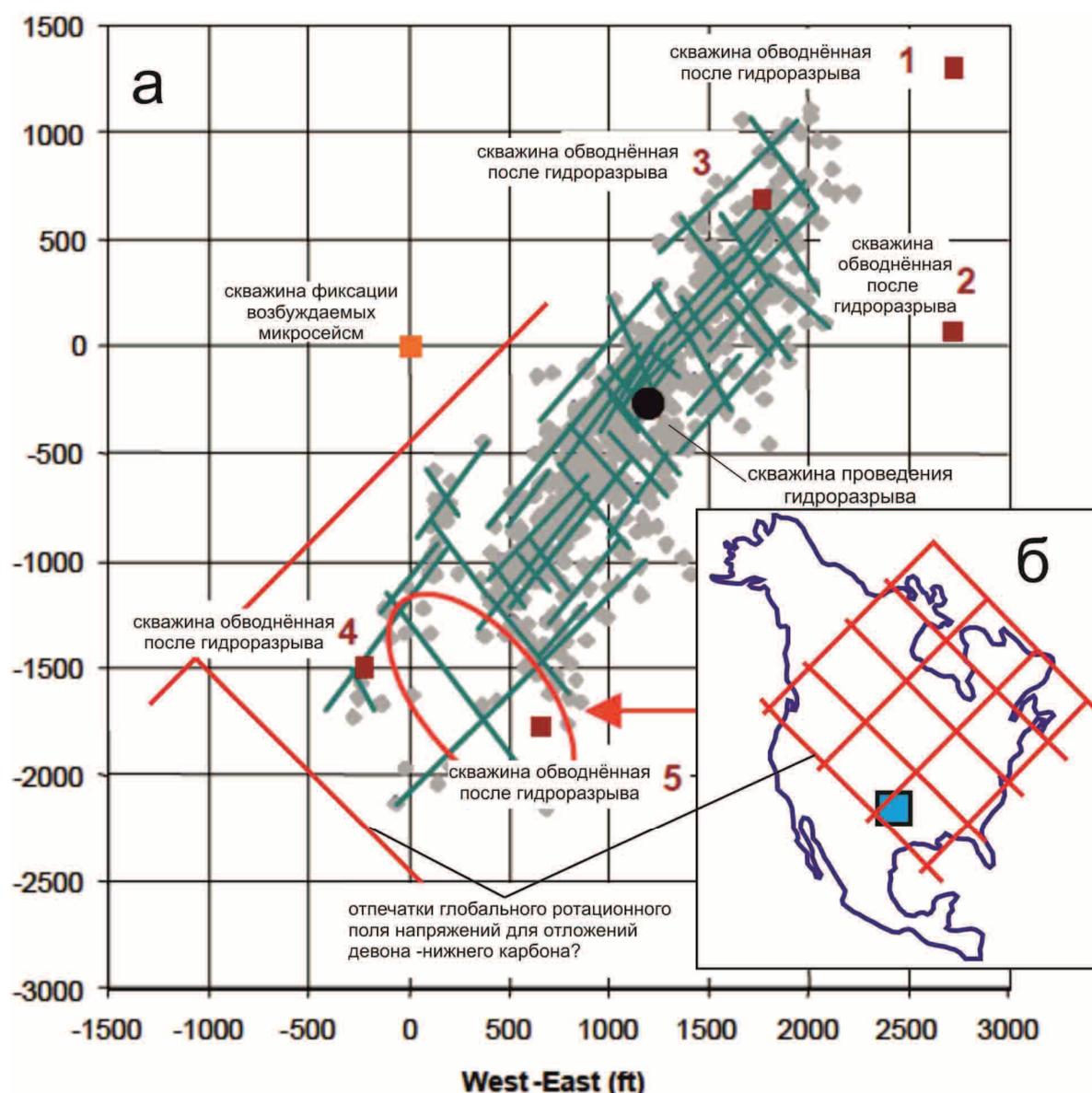


Рис. 5. а) результаты микросейсмических исследований проведённого гидроразрыва в нижнекарбоневой сланцевой толще Barnett [16]; б) отпечатки глобального ротационного поля напряжений для отложений девона-карбона Северной Америки [5]

Fig. 5. а) the results of micro-seismic surveys of the carried out reservoir fracturing of shale formation Barnett [17]; б) mold of global rotating stress field for Devonian-Carbon deposits in North America

должительность рентабельной эксплуатации [14, 15]. В этой связи можно рассмотреть сопоставление ориентации выделяемого глобального поля напряжений для отложений девона-карбона Северо-Американского континента [16] и поля распределения микросейсмических исследований, полученных при гидроразрыве нижекарбоновой сланцевой толщи Barnett (рис. 5).

Как следует из рисунка, гидроразрыв порождает совокупность микросейсм. Выделяемая область сейсмической активности при общей северо-восточной направленности сформирована многочисленными участками микросейсм северо-восточной и северо-западной ориентировки (рис. 5, а), которые хорошо сопоставимы с прогнозируемым полем глобальных напряжений ротационного поля рассматриваемого стратиграфического горизонта данного района (рис. 5, б) по литературным источникам [5].

Как следует из анализа режима работы скважин, влияние гидроразрыва распространяется за пределы области фиксации микросейсм. После проведения гидроразрыва ряд скважин, расположенных в непосредственной близости, были обводнены, что вероятно связано с поступлением в них жидкости, применяемой при закачке пропанта.

Развитие обширной зоны трещиноватости благоприятно для притока углеводородов из сланцевой

толщи и формирования в ней свободного пустотного пространства. Наличие пустотного пространства в свою очередь способствует дальнейшей активизации процесса трещиноватости по существующим зонам планетарной напряжённости горных пород.

Выводы

1. Элементы планетарной трещиноватости в отложениях платформенного чехла отмечаются по ориентированной трещиноватости в керне скважин [4].
2. Планетарная трещиноватость (напряжённость) горных пород может быть выделена по данным сейсморазведки [10, 17, 18] и использована для повышения эффективности разработки месторождений нефти и газа.
3. Определённая пространственная ориентировка ортогональных трендов планетарной трещиноватости в разновозрастных толщах позволяет формировать на её основе технологические схемы эксплуатации залежей углеводородов.
4. Наиболее эффективно использование трендов планетарной трещиноватости при разработке залежей УВ в терригенных коллекторах пониженной проницаемости и битуминозных сланцевых толщах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещинных коллекторов. – М.: Недра, 1971. – 160 с.
2. Новиков А.С. О трещиноватости осадочных пород восточной части Русской платформы // Изв. АН СССР, сер. геол. – 1951. – № 5. – С. 68–86.
3. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость. – Л.: ЛГУ, 1973. – 176 с.
4. Микуленко К.И., Шемин Г.Г. Трещиноватость юрских и нижнемеловых пород Обь-Иртышского междуречья // Тр. Сиб. науч.-исслед. ин-та геол., геофиз. и минер. сырья. – 1971. – Вып. 132. – С. 90–101.
5. Долицкий А.В. Реконструкции тектонических структур. – М.: Недра, 1978. – 148 с.
6. Долицкий А.В. Земная кора: образование, деформация, развитие, тектоника вращающейся мантии // Ротационные процессы в геологии и геофизике. – М.: КомКнига, 2007. – С. 115–163.
7. Белозёров В.Б. Возможности использования планетарной трещиноватости в разработке залежей нефти и газа // В сб.: 30 лет на службе Томской области. Тр. Сиб. науч.-исслед. ин-та геол., геофиз. и минер. сырья. – Новосибирск, 2002. – С. 136–139.
8. Денисов С.Б. Влияние сдвиговой тектоники на формирование нефтегазовых месторождений Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 4. – С. 14–18.
9. Краснощёкова Л.А. Наложённый эпигенез коллекторов Игольско-Талового месторождения // Актуальные вопросы геологии и географии Сибири: Сборник трудов. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – С. 82–84.
10. Белоновская Л.Г. Трещиноватость горных пород и разработанные во ВНИГРИ основы поисков трещинных коллекторов нефти и газа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2006. – Т. 1. URL: <http://www.ngtp.ru/rub/10/04.pdf> (дата обращения: 08.05.2013).
11. Анохин В.М., Одесский И.А. Характеристики глобальной сети планетарной трещиноватости // Геотектоника. – 2001. – № 5. – С. 3–9.
12. Довбнич М.М., Мачула М.С., Мендрий Я.В. Опыт прогноза трещиноватых зон при изучении нефтеперспективных юрских отложений Западной Сибири // Геоинформатика. – 2010. – № 1. – С. 50–56.
13. Белозёров В.Б. Литолого-седиментационные модели. – Saarbrücken: Academic Publishing, 2014. – 111 с.
14. Лобусев А.В., Лобусев М.А., Вертиевец Ю.А., Кулик Л.С. / Баженовская свита – дополнительный источник углеводородов в Западной Сибири // Территория нефтегаз. – 2011. – № 3. – С. 28–31. URL: http://www.neftegas.info/upload/iblock/c44/28_31.pdf (дата обращения: 05.10.2013).
15. Балущкина И.С., Афанасьев Е.В., Гаврилова Е.М., Бирун Г.А., Калмыков Н.С. Баженовская свита. Общий обзор, нерешенные проблемы // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть». – 2010. – № 4. – С. 20–25.
16. Fisher M.K., Wright C.A., Davidson B.M., Goodwin A.K., Fielder E.O., Buckler W.S., Steinsberger N.P. // Optimizing Horizontal Completion Techniques in the Barnett Shale Using Microseismic Fracture Mapping. URL: <http://discoverygeo.com/Papers/SPE%2090051.pdf> (дата обращения: 02.02.2014).
17. Файзуллин И.С., Чиркин И.А. Сейсмоакустические методы изучения трещиноватости горных пород // Геоинформатика. – 1998. – № 3. – С. 24–27.
18. Изучение трещиноватости горных пород многоволновыми поляризационными методами: сейсморазведкой, ВСП и акустическим каротажем // НПП ГЭТЭК. URL: <http://www.getek.ru/fissured.html> (дата обращения: 02.02.2014).

Поступила 15.02.2014 г.

UDC 662.276:552.578.2.061.43

PLANAR FRACTURING AND DEVELOPMENT OF PETROLEUM RESERVOIRS

Vladimir B. Belozеров,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: BelozеровVB@hw.tpu.ru

The research is relevant in the context of improvement of oil and gas recovery in low-permeability clastic reservoirs and shale.

The main aim of the research is to substantiate the use of planar fracturing to improve oil and gas recovery in low-permeability clastic reservoirs. The research is based on a correlation between currently available theoretical developments on planar fracturing and practical data obtained with petroleum geology, lithology and seismology of upper Jurassic and lower Cretaceous formations in West Siberia. **Research methods:** determination of the planar fracturing system with seismic survey (Prony's method), observation of the oriented core fracturing, lithologic and petrographic research of rock formations density zones, analysis of the reservoir production capacity in its expected zones of planar fracturing.

Results. The author has analyzed Igolsk oilfield J_2 reservoir development. The paper demonstrates the interconnection of the increased rates with rock formation density zones, determined by the seismic survey. The author correlated the density zones with the orientation of the planar fracturing system in upper Jurassic formations in West Siberia. The relation between the fracturing and the reservoir intervals of high clay content are introduced with lithology research data. The author compared the orientations of the global density field for Devonian-Carbon deposits in North America and the field of distribution of microseismic researches obtained at hydraulic fracturing of Low-Carbon shale formation Barnett. It was shown that the seismic activity area was formed by multiple regions of microseisms in northern-east and northern-west orientations which correspond to the predicted directions of rotating field global densities of the considered stratigraphic horizon in this region by the literary sources.

Key words:

Planar fracturing, seismic cross-section, technological development scheme, petroleum reservoir, rock formation density zones.

REFERENCES

- Rats M.V., Chernyshev S.N. *Treshchinovost i svoystva treshchinnykh kollektorov* [Fracture properties and fractured reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 160 p.
- Novikov A.S. O treshchinovosti osadochnykh porod vostochnoy chasti Russkoy platformy [On fractured sedimentary rocks of the eastern part of Russian platform]. *Math. USSR Academy of Sciences, Ser. Geo.*, 1951, no. 5, pp. 68–86.
- Schults S.S. *Planetarnaya treshchinovost* [Planetary fracture]. Leningrad, Leningrad State University Press, 1973. 176 p.
- Mikulenko K.I., Shemin G.G. Treshchinovost yurskikh i nizhnemelovykh porod Ob-Irtyshskogo mezhdurechya [Fracturing of the Jurassic and Lower Cretaceous rocks of Ob-Irtysh interfluvium]. *Trudy Sibirskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya* [Proc. of Siberian Scientific-Research Institute of Geology, geophysics and minerals], 1971, no. 132, pp. 90–101.
- Dolitsky A.V. *Rekonstruktsii tektonicheskikh struktur* [Reconstruction of tectonic structures]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 148 p.
- Dolitsky A.V. Zemnaya kora: obrazovanie, deformatsiya, razvitiye, tektonika vrashchayushcheyasya mantii [The crust: formation, strain, development, tectonics of rotating mantle]. *Rotatsionnye protsessy v geologii i geofizike* [Rotation processes in geology and geophysics]. Moscow, KomKniga Publ., 2007. 523 p.
- Belozеров V.B. Vozможности ispol'zovaniya planetarnoy treshchinovosti v razrabotke zalezhey nefti i gaza [Possibilities of using planetary fracturing in developing oil and gas deposits]. *30 let na sluzhbu Tomskoy oblasti. Trudy SNIIGiMS* [30 years in the service of the Tomsk region. Proc. Siberian Scientific-Research Institute of Geology, geophysics and minerals]. Novosibirsk, 2002. pp. 136–139.
- Denisov S.B. Vliyaniye sdvigov tektoniki na formirovaniye neftegazovykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri [Influence of shear tectonics on formation of oil and gas fields in Western Siberia]. *Oil Industry*, 2001, no. 4, pp. 14–18.
- Krasnoshchekova L.A. Naloozhenny epigenez kollektorov Igolsko-Talovogo mestorozhdeniya [Superimposed epigenesis of collectors of Igolsko-Talov field]. *Aktualnye voprosy geologii i geografii Sibiri: Sbornik trudov* [Urgent problems of geology and geography of Siberia. Collected papers]. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University, 1998. pp. 82–84.
- Belonovskaya L.G. Treshchinovost gornykh porod i razrabotaniye vo VNIGRI osnovy poiskov treshchinnykh kollektorov nefti i gaza [Fracturing of rocks and developed in VNIGRI bases of searching for fractured reservoirs of oil and gas]. *Petroleum geology. Theory and practice*, 2006, vol. 1. Available at: <http://www.ngtp.ru/rub/10/04.pdf> (accessed 8 May 2013).
- Anokhin V.M., Odessky I.A. Kharakteristiki globalnoy seti planetarnoy treshchenovosti [Features of WAN planetary fracturing]. *Geotectonics*, 2001, no. 5, pp. 3–9.
- Dovbnich M.M., Machula M.S., Mendry Ya.V. Opyt prognoza treshchenovatykh zon pri izuchenii nefteperspektivnykh yurskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri [Experience in predicting fractured zones when studying oil-Jurassic deposits of Western Siberia]. *Geoinformatics*, 2010, no. 1, pp. 50–56.
- Belozеров V.B. *Litologo-sedimentatsionnye modeli* [Lithologic and depositional models]. Saarbrücken, Academic Publishing, 2014. 111 p.
- Lobusev A.V., Lobusev M.A., Vertievets Yu.A., Kulik L.S. Bazhenovskaya svita – dopolnitelny istochnik uglevodorodov v Zapadnoy Sibiri [Bazhenov formation is the additional source of hydrocarbons in Western Siberia]. *Territoriya Neftegaz*, 2011, no. 3, pp. 28–31. Available at: http://www.neftegas.info/upload/iblock/c44/28_31.pdf (accessed: 5 October 2013).
- Afanasiev I.S., Gavrilova E.V., Birun E.M., Kalmykov G.A., Balushkin N.S. Bazhenovskaya svita. Obshchyy obzor, nereshennyye problemy [Bazhenov formation. General overview and unresolved problems]. *Scientific and Technical Gazette of «Rosneft»*, 2010, no. 4, pp. 20–25.
- Fisher M.K., Wright C.A., Davidson B.M., Goodwin A.K., Fielder E.O., Buckler W.S., Steinsberger N.P. Optimizing Horizontal Completion Techniques in the Barnett Shale Using Microseismic Fracture Mapping. *SPE Annual Technical Conference*. Houston, 2004. Available at: <http://discoverygeo.com/Papers/SPE%2090051.pdf> (accessed 2 February 2014).
- Fayzullin I.S., Chirkin I.A. Seismoakusticheskie metody izucheniya treshchinovosti gornykh porod [Seismic methods for studying fracturing of rocks]. *Geoinformatics*, 1998, no. 3, pp. 24–27.
- Izucheniye treshchinovosti gornykh porod mnogovolnovnymi polarizatsionnymi metodami: seismorazvedkoy, VSP i akusticheskimi karotazhom [The study of rocks by the multi-wave polarization methods: seismic survey, VSP and sonic log]. *SPE GETEK*. Available at: <http://www.getek.ru/fissured.html> (accessed 2 February 2014).

Received: 15 February 2014.

УДК 553.98:551.763:550.836

НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ НИЖНЕМЕЛОВЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НЮРОЛЬСКОЙ МЕГАВПАДИНЫ

Осипова Елизавета Николаевна,

ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых
Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 635050, г. Томск,
пр. Ленина, д. 30. E-mail: osipovaen@list.ru

Лобова Галина Анатольевна,

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

Исаев Валерий Иванович,

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

Старостенко Виталий Иванович,

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

Актуальность исследований обусловлена необходимостью воспроизводства и расширения ресурсной базы территории нефтепромыслов Томской области. Это направление развития нефтегазового комплекса, наращивания сырьевого потенциала является ресурсосберегающим, минимизирующим объемы капитальных затрат на разведку, освоение и последующую добычу.

Цель исследований: определить и предложить первоочередные районы для поисков и освоения нижнемелового нефтегазового комплекса на территории Нюрольской мегавпадины и структур ее обрамления.

Объекты исследований: склоновые (клиноформные) части циклитов неокома – ачимовский резервуар, и ундаформные (мелководно-шельфовые) части циклитов неокома – шельфовый резервуар. Отложения неокома слабоизучены и характеризуются сложным типом ловушек и трудной идентификацией продуктивных пластов.

Методы исследований: геокартирование резервуаров; компьютерные палеотектонические реконструкции и палеотемпературное моделирование разреза осадочного чехла, включая нефтематеринские отложения; выделение по геотемпературному критерию и картирование очагов интенсивной генерации баженовских нефтей; оценка распределения плотности генерированных нефтей; оценка и анализ распределения относительной плотности ресурсов нефтей в ачимовском и шельфовом резервуарах неокома; районирование резервуаров по степени перспективности.

Результаты исследований. Дана объемно-площадная характеристика ачимовского и шельфового резервуаров неокома – построены карты суммарных толщин 7-ми циклитов ачимовских и 5-ти циклитов шельфовых отложений; реконструирована термическая история баженовских отложений в разрезах 39-ти глубоких скважин; на 18-ти ключевых моментах геологического времени выделены и закартированы палеоочаги генерации баженовских нефтей; построена карта распределения плотности ресурсов генерированных нефтей; построены карты распределения относительной плотности аккумулярованных ресурсов и выполнено районирование ачимовского и шельфового резервуаров; предложены первоочередные районы поисков для ачимовского резервуара – зона юго-восточного склона Каймысовского свода, зона сочленения Чузискско-Чижалпской и Шингинской мезоседловин, 30-километровая зона субмеридиального простираения в центральной части Нюрольской мегавпадины; предложены первоочередные районы поисков для шельфового резервуара – зона меридионального простираения, охватывающая восточную половину Кулан-Игайской впадины и западную часть Фестивального вала (3500 км²), и зона сочленения северного борта Нюрольской мегавпадины с восточным склоном Каймысовского свода и с юго-западным склоном Средневасюганского мегавала (500 км²).

Ключевые слова:

Ачимовский и шельфовый резервуары неокома, термическая история баженовских отложений, плотность ресурсов генерированных нефтей, Нюрольская мегавпадина.

Введение

Представление о клиноформном строении верхнеюрских и нижнемеловых отложений Западно-Сибирской плиты формировалось более 50 лет, начиная с работ Ф.Г. Гурари (1962). Тектоно-седиментационной истории и нефтегазоносности нижнемеловых отложений Западной Сибири посвящен ряд новейших работ ученых и специалистов

[1, 2 и др.]. В нижней части мелового разреза – неокоме, в ачимовских отложениях, открыты крупные промышленные залежи углеводородов (УВ) практически на всей территории Западной Сибири, за исключением юго-востока [3].

Территория исследований – юго-восток Западной Сибири, земли действующих нефтепромыслов Томской области (рис. 1, А). Наращивание и осво-

ение на этих землях сырьевого потенциала – одно из ключевых направлений развития томского нефтегазового комплекса. Это направление, очевидно, является наиболее ресурсосберегающим, минимизирующим объемы капитальных затрат. Разрабатываемые здесь залежи в основном принадлежат верхнеюрскому нефтегазоносному комплексу (НГК). Нефтяные месторождения, включая наиболее крупные, приурочены к антиклинальным структурам. Однако к настоящему времени фонд антиклинальных структур практически исчерпан. Высокая плотность сейсморазведочных работ не позволяет рассчитывать на открытие новых залежей в антиклинальных структурах, а следовательно, и на существенное расширение разведочной и промысловой базы в этом НГК. Поэтому, наряду с выявлением неантиклинальных поисковых объектов в верхнеюрской васюганской свите, приоритетными направлениями геологоразведочных работ становятся поиски и разведка залежей УВ в сложнопостроенных ловушках, приуроченных к нижнеюрскому и меловому (неокомскому) НГК.

Объектом настоящих прогнозных исследований являются склоновые (клиноформные) части циклитов неокома – ачимовский резервуар и ундаформные (мелководно-шельфовые) части циклитов неокома – шельфовый резервуар.

В Томской области поиски и разведка в меловом НГК ранее были малопривлекательными из-за сложного типа ловушек, а низкоомность продуктивных пластов неокома существенно затрудняла их идентификацию в разрезе. На сегодняшний день возможность высокоэффективной поисковой сейсморазведки и новые методики интерпретации данных ГИС снимают указанные трудности [4 и др.]. Определить и предложить первоочередные районы для изучения и освоения нижнемелового НГК – цель проведенных исследований.

Исследования выполнены на базе палеотектонических реконструкций и палеотемпературного моделирования, выделения по геотемпературному критерию и картирования очагов интенсивной генерации баженовских нефтей, анализа распределения плотности ресурсов нефтей в ачимовском и шельфовом резервуарах и, как следствие, последующего районирования этих резервуаров по степени перспективности.

Источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового НГК является рассеянное органическое вещество (РОВ) отложений баженовской свиты. Проблематичность возможности, дальности и вероятных механизмов миграции нефти из баженовских отложений в вышележащие коллекторы находит разрешение в результатах послыжного изучения «прямыми» методами органической геохимии продуктивных, над- и подпродуктивных отложений. Так, согласно полученным результатам по Рогожниковской группе месторождений Краснотенского свода [5, 6], расстояние вертикального межпластового перемещения УВ из юрской зоны (тутлеймской свиты) в

меловые отложения оценивается в 800...1000 м (до хантымансийской свиты). Мигрирующие по вертикали УВ только «притормаживаются» флюидопорами, накапливаясь в коллекторах.

При катагенезе РОВ решающим фактором интенсивности генерации УВ являются геотемпературы [7, 8]. Балансовая модель процессов нефтегазообразования в баженовской свите [9] позволяет по геотемпературному критерию прогнозировать очаги интенсивного образования УВ из РОВ: с 85–95 °С – вхождение материнских пород в главную зону нефтеобразования (ГЗН). Балансовая модель А.Э. Конторовича и пороговые геотемпературы ГЗН [9] подтверждаются результатами экспериментальных и теоретических исследований [10, 11 и др.].

Ранее, в работе [12], уже рассматривались очаги генерации баженовских нефтей и нефтеперспективные зоны меловых отложений Нюрольской мегавпадины. Если ранее [12] очаги генерации были выделены на построенной карте распределения измеренных пластовых температур верхнеюрских отложений, то в настоящей работе палеоочаги генерации баженовских нефтей выделены по результатам математического моделирования термической истории непосредственно баженовских отложений, а нефтеперспективные зоны определены для клиноформных и шельфовых отложений неокома раздельно.

Характеристика нефтегазоносности территории

Основная часть территории исследования расположена в пределах Каймысовской нефтегазоносной области. Продуктивными комплексами являются меловой, верхнеюрский, среднеюрский, нижнеюрский и палеозойский. На территории исследований открыто 49 месторождений УВ (рис. 1, А).

Для средне-, нижнеюрского и палеозойского НГК нефтематеринской является *тогурская свита* (J_{1t_1}) с РОВ гумусового и смешанного типов [13]. Отложения свиты выклиниваются на положительных структурах, над выступами кристаллического фундамента.

В *палеозойском НГК* коллекторскими свойствами обладают измененные породы, развитые по карбонатным и терригенно-карбонатным образованиям, а также кора выветривания по магматическим и метаморфическим породам кислого состава. *Нижнеюрский НГК* представлен песчаными пластами Ю₁₇₋₁₆ урманской и Ю₁₅ салатской свит, с ловушками структурно-литологического и тектонически экранированного типа. *Среднеюрский НГК* сформировался в объеме салатской и тюменской свит, где выделяются песчано-алевритовые пласты Ю₁₄₋₂, разделенные углисто-глинистыми пачками. *Верхнеюрский НГК* объединяет васюганскую, георгиевскую и баженовскую свиты. Васюганская свита разделена по литологическому составу на нижнюю, существенно глинистую, и верхнюю подсвиты, где 4–5 песчаных пластов в совокупности составляют регионально-нефтегазонос-

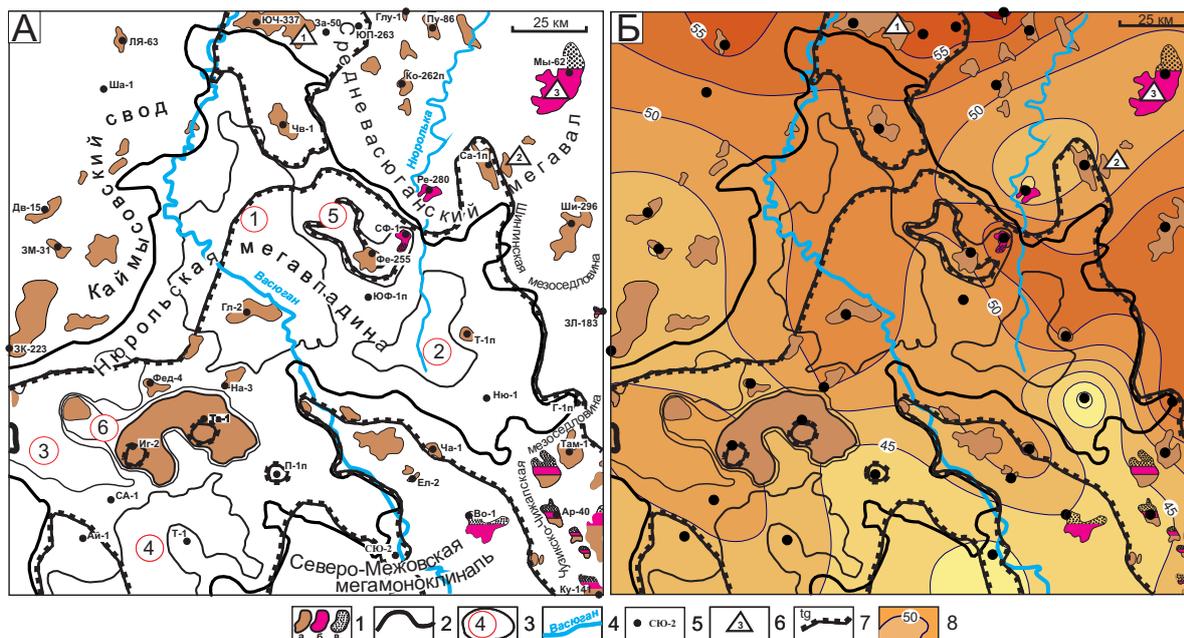


Рис. 1. Схематические карты нефтегазоносности (А) на тектонической основе [14] и распределения значений плотности теплового потока из доюрского основания (Б) Нюрольской мегавпадины: 1) месторождения: а – нефтяное, б – конденсатное, в – газовое; 2) граница Нюрольской мегавпадины; 3) структура III порядка и ее условный номер; 4) речная сеть; 5) исследуемая скважина (палеотемпературное моделирование) и ее условный индекс; 6) условный номер месторождения мелового НГК: 1 – Южно-Черемшанское; 2 – Южно-Мыльдзинское; 3 – Мыльдзинское; 7) граница зоны распространения тогурской свиты; 8) изолинии значений расчетной плотности теплового потока из основания осадочного чехла, мВт/м². Структуры: 1 – Кулан-Игайская впадина, 2 – Тамрадская впадина, 3 – Осево́й прогиб, 4 – Тамянский прогиб; 5 – Фестивальный вал, 6 – Игольско-Таловое куполовидное поднятие

Fig. 1. Contour maps of oil-and-gas tectonic-based potential [14] (A) and heat flow density values distribution from pre-Jurassic base (B) to Nyurok'ka megadepression: 1) deposits: a – oil, б – condensate, в – gas; 2) Nyurok'ka megadepression boundary; 3) structure of III order and its reference number; 4) river net; 5) the well under study (paleotemperature modelling) and its conventional index; 6) reference number of a deposit of a cretaceous oil and gas complex: 1 – Yuzhno-Cheremshanskoe; 2 – Yuzhno-Myldzhinskoe; 3 – Myldzhinskoe; 7) the boundary of a zone where togursk strata is spread; 8) isolines of reference density values of a heat flow from a sedimentary section base, mW/m². Structures: 1 – Kulan-Igaysk depression, 2 – Tamradskaya depression, 3 – Osevoy downfold, 4 – Tamyansk downfold; 5 – Festivalny swell, 6 – Igolsko-Talovoe arch

ный горизонт Ю₁. Георгиевская свита имеет глинистый состав и весьма непостоянную мощность по площади.

Для нижнемелового и верхнеюрского НГК основным источником углеводородов является РОВ сапропелевого типа *баженовской свиты* (J_3v), региональный генерационный потенциал которой обусловлен высоким содержанием Сорг (до 12 %), катагенезом середины градации МК₁ и распространением по всей площади исследований мощностью от 8 до 30 м [8].

Меловой НГК характеризуется сложным геологическим строением пластов от берриаса до нижнего апта, преимущественным развитием неантиклинальных ловушек литологического и комбинированного типов [15].

В юго-восточной части Западной Сибири (Томская область) с востока на запад выделяется ряд палеогеоморфологических обстановок осадконакопления: континентальная, прибрежно-морская, мелководно-шельфовая (ундаформная), склоновая и депрессионная (фондоформная). Склоновую принято называть клиноформной частью морских отложений неокома.

Клиноформные осадки (ачимовские пласты) отнесены к перспективным, и они нефтегазоносны на Мыльдзинском месторождении (табл. 1). Испытания отложений ачимовского резервуара в ряде скважин на других площадях не дали положительных результатов: Шахматная 1 (рис. 1, А, условный индекс Ша-1), интервал 2344...2379 м – «сухо»; Южно-Черемшанская 337 (рис. 1, А, ЮЧ-337), интервал 2668...2628 м – «сухо»; Южно-Черемшанская 340, интервал 2383...2458 м – «вода»; Таловая 6, интервал 2748...2757 м – «вода».

В пределах исследуемой территории картируются мелководно-шельфовые (ундаформные) части пяти, из десяти выделенных в Томской области, субмеридионально вытянутых циклитов [16]. Они, «черепицеобразно накладывающиеся друг на друга», смещаются с востока на запад. Наиболее древний Вахский циклит, занимающий восточную часть территории, перекрывается осадками Столбового циклита, перекрытого Лонтынь-Яхским циклитом, на котором залегает Первомайский циклит. Последний перекрывается наиболее молодым Сороминским циклитом, расположенным в западной части исследуемой территории. Сор-

Таблица 1. Характеристика месторождений Нюрольской мегавпадины и структур обрамления с залежами в меловом нефтегазоносном комплексе**Table 1.** Characteristic of Nyuroł'ka megadepression fields and framing structures with deposits in Cretaceous oil and gas complex

Месторождение Deposit	НГК Oil and gas complex	Фазовое состояние Phase state	Горизонт, пласт Horizon, formation
Южно-Черемшанское Yuzhno-Cheremshanskoe	Меловой Cretaceous	Нефть/Oil	A ₂₋₇ , A ₉₋₁₀ , B ₄₋₁₀ , B ₁₂₋₁₃
		Газ/Gas	A ₂₋₇ , B _{0, 4-13}
Нефть/Oil		B ₉₋₁₃	
Газ/Gas		B _{9,10} , B ₁₁₋₁₂ , B ₁₃	
Газоконденсат Gas condensate		A ₂₋₇ , B _{0,4-10, 12, 13} , B ₁₆₋₂₀	
Верхнеюрский Upper-Jurassic		Газоконденсат, нефть Gas condensate, oil	Ю ₁

минский циклит размещается в основном на тюменских землях. Залежи УВ в шельфовом резервуаре неокома на территории исследований разрабатываются на 3-х месторождениях.

Определенные трудности в изучении нижнемеловых отложений создает неоднозначная индексация и стратиграфическая привязка морских пластов неокома. Мы пользуемся индексацией томских геологов [15]. В материалах по испытанию глубоких скважин, использованных в наших исследованиях, мелководно-шельфовые отложения рассматриваются нами в объеме пластов B₈-B₁₂ тарской свиты, а клиноформные отложения – в объеме пластов B₁₆₋₂₀ куломзинской свиты.

Распространение ачимовского и шельфового резервуаров

С использованием работы [16] нами обобщено развитие клиноформных неокомских отложений для Нюрольской мегавпадины и обрамляющих ее положительных структур (рис. 2). Рис. 2, А показывает схему расположения и толщины клиноформных коллекторов семи циклитов. На основе этой схемы построена карта суммарных толщин ачимовского резервуара (рис. 2, Б).

Наибольшие толщины ачимовского резервуара (до 80 м) картируются на северо-восточном склоне Каймысовского свода, до 60 м – в зоне сочленения Нюрольской мегавпадины и Северо-Межовской

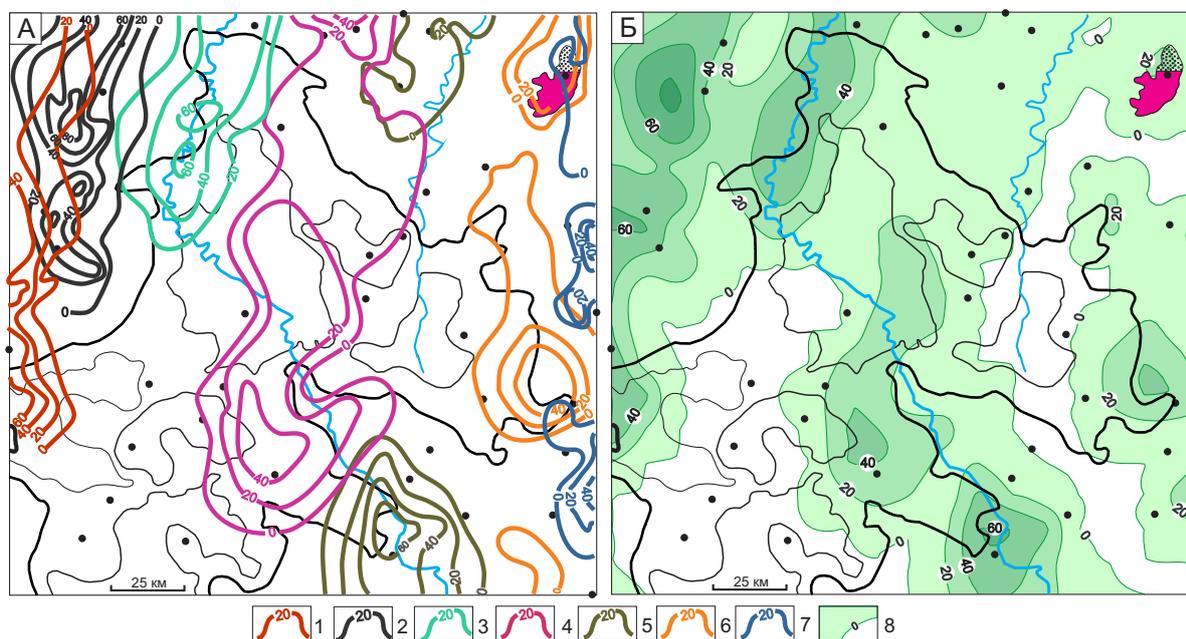


Рис. 2. Схематические карты изопахит клиноформ по циклитам неокома (А) по данным [16], суммарных толщин ачимовского резервуара (Б) Нюрольской мегавпадины. Мощности клиноформ циклитов, м: 1) Первомайского, 2) Лонтын-Яхского, 3) Столбового, 4) Вахского, 5) Назинского, 6) Нюрольского, 7) Казанского; 8) суммарные толщины, м. Показано Мылдзинское месторождение с газоконденсатными залежами в коллекторах клиноформ. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 2. Contour maps of clinoform isopachs according to Neocomian cyclites (A) by the data in [16], cumulative thickness of Achimovka reservoir (B) of the Nyuroł'ka megadepression. Thickness of cyclites clinoforms, m: 1) Pervomaysky, 2) Lontyn-Yakhsky, 3) Stolbovoy, 4) Vakhsky, 5) Nazinsky, 6) Nyuroł'sky, 7) Kazansky; 8) cumulative thickness, m. The figure demonstrates Myldzhinskoe field with gas condensate deposits in clinoform reservoir rocks. The rest symbols are the same as in Fig. 1

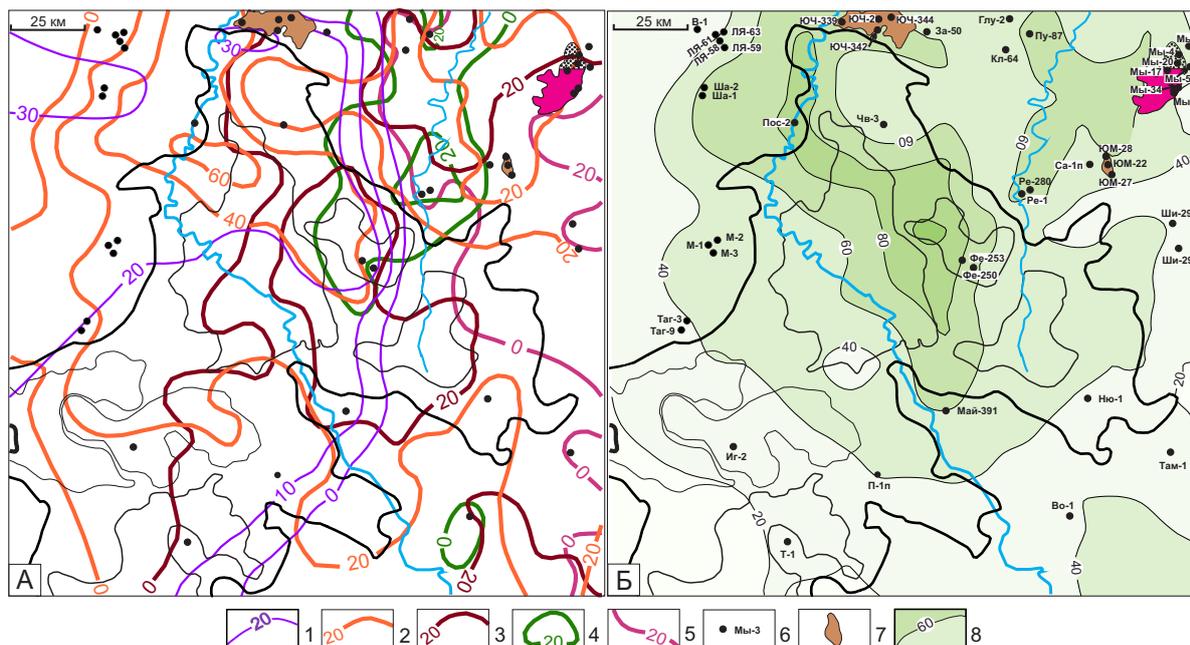


Рис. 3. Схематические карты изопачит мелководно-шельфовой части циклитов (А) и суммарных толщин шельфовых пластов (Б) неокома Нюрольской мегавпадины. Изопачиты циклитов, м: 1) Сороминского, 2) Первомайского, 3) Лонтынь-Яхского, 4) Столбового, 5) Вахского; 6) скважины, в которых вскрыты и проведены испытания ундаформных пластов неокома, условный индекс скважины; 7) месторождения с залежами УВ в коллекторах мелководного шельфа; 8) суммарные толщины, м. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 3. Contour maps of isopachs in shallow shelf parts of cyclites (A) and cumulative thickness of shelf layers (B) of Neocomian Nyrul'ka megadepression. Cyclites isopachs, m: 1) Sorominsky, 2) Pervomaysky, 3) Lontyn-Yakhsy, 4) Stolbovoy, 5) Vakhsy; 6) wells, where Neocomian undafom layers were entered and tested, conventional index of the well; 7) fields with hydrocarbon deposits in reservoir rocks of a shallow shelf; 8) cumulative thickness, m. The rest symbols are the same as in Fig. 1

мегамоноклинали. Клиноформные отложения (до 40 м) распространены в северо-западной части мегавпадины, западной части Осевого прогиба и северо-восточнее Тамянского прогиба. Отсутствие ачимовского резервуара обозначается крупным «заливом» в юго-западной части территории исследований и подковообразной полосой на востоке.

На основе ранее проведенных исследований [15, 16] нами обобщено развитие нижнемеловых мелководно-шельфовых отложений для Нюрольской мегавпадины и обрамляющих ее положительных структур (рис. 3). Распространение отложений Сороминского циклита исследователями не картировалось, поэтому в нашей работе толщина отложений мелководного шельфа Сороминского циклита учтена по данным бурения глубоких скважин, в которых проводились исследования неокома (табл. 2).

Схематическая карта на рис. 3, А иллюстрирует толщины мелководно-шельфовых частей пяти циклитов. Путем интерполяции и суммирования построена схематическая карта суммарных толщин отложений шельфового резервуара неокома (рис. 3, Б).

О методике палеотемпературного моделирования

Восстановление термической истории отложений баженовской свиты выполнено на основе палеотектонических реконструкций и палеотемпера-

турного моделирования [17]. В модели процесс распространения тепла в слоистой осадочной толще описывается начально-краевой задачей для уравнения

$$\frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial Z} \right) = f, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность; a – температуропроводность; f – плотность тепловыделения внутренних источников тепла; U – температура; Z – расстояние от основания осадочного разреза; t – время. С краевыми условиями

$$U|_{Z=\varepsilon} = U(t), \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial U}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = q(t), \quad (3)$$

где $\varepsilon = \varepsilon(t)$ – верхняя граница осадочной толщи; $q(t)$ – тепловой поток из основания осадочного разреза. Как видно из формулировки задачи, палеотектонические реконструкции непосредственно сопряжены с расчетом палеотемператур.

Осадочная толща описывается мощностями стратиграфических комплексов h_i , для каждого из которых заданы теплопроводность λ_i , температуропроводность a_i , плотность тепловыделения радиоактивных источников f_i в породах осадочного разреза и время осадконакопления t_i (рис. 4). Скорость осадконакопления v_i может быть нулевой и

Таблица 2. Данные* по испытанию глубоких скважин, в которых исследовались ундаформные отложения тарской свиты Ньюрольской мегавпадины и структур обрамления**Table 2.** Data* on testing deep wells where undamorf deposits of Tarsk strata of Nyurol'ka megadepression and framing structures were studied

Название площади, номер скважины Area name, well number	Условный индекс скважины (рис. 3, Б) Conventional index of a well (Fig. 3, B)	Интервал (глубина) испытания, м interval (depth) of testing, m	Пласты Layers	Приток, м ³ /сут. Influx, m ³ /day	Тип флюида Fluid type
Волковская 1/Volkovskaya 1	В-1	2243...2268	Б ₈	4,0	Вода/Water
Лонтын-Яхская 58/Lontyn-Yakhsкая 58	ЛЯ-58	2177...2184	Б ₈	55,2	
Лонтын-Яхская 59/Lontyn-Yakhsкая 59	ЛЯ-59	2082...2111	Б ₈	5,8	
		2228...2297	Б ₁₀	2,5	
Лонтын-Яхская 61/Lontyn-Yakhsкая 61	ЛЯ-61	2079...2101	Б ₈	7,7	
Лонтын-Яхская 63/Lontyn-Yakhsкая 63	ЛЯ-63	2104...2133	Б ₉	3,0	
		2183...2200	Б ₈	2,5	
Шахматная 1/Shakhmatnaya 1	Ша-1	2214...2255	Б ₁₀	7,3	
		2232...2322	Б ₁₀₋₁₁	3,4	
Шахматная 2/Shakhmatnaya 2	Ша-2	2355...2374	Б ₁₀	7,4	
Поселковая 2/Poselkovaya 2	М-1	2176...2180	Б ₉	691,2	
		2229...2232	Б ₁₁	357,6	
		2243...2247	Б ₁₂	324,0	
Моисеевская 2/Moiseevskaya 2	М-2	2268...2274	Б ₁₂	21,6	
Моисеевская 3/Moiseevskaya 3	М-3	2141...2145	Б ₈	58,0	
		2239...2243	Б ₁₂	278,8	
Тагайская 3/Tagayskaya 3	Таг-3	2323...2329	Б ₉	34,0	
Тагайская 9/Tagayskaya 9	Таг-9	2455...2465	Б ₉	557,0	
Южно-Черемшанская 2/Yuzhno-Cheremshanskaya 2	ЮЧ-2	2264...2269	Б ₈	7,1/1,6	Нефть/вода /Oil/Water
		2271...2273	Б ₈₋₉	8,2	Нефть/Oil
		2264...2274	Б ₉	35,7	
Южно-Черемшанская 3/Yuzhno-Cheremshanskaya 3	ЮЧ-3	2328...2330	Б ₈	41,0/33,0	Нефть/вода/Oil/Water
		2354...2357	Б ₁₁₋₁₂	35,2/1,8	
		Южно-Черемшанская 339/Yuzhno-Cheremshanskaya 339	ЮЧ-339	2390...2425	Б ₁₀
Южно-Черемшанская 342/Yuzhno-Cheremshanskaya 342	ЮЧ-342	2429...2518	Б ₈₋₁₀	4,2	Вода Water
Южно-Черемшанская 344/Yuzhno-Cheremshanskaya 344	ЮЧ-344	2450...2494	Б ₁₀	2,5	
Заячья 50/Zayachya 50	За-50	2564...2624	Б ₁₀	0,5	
Чворовая 3/Chvorovaya 3	Чв-3	2450...24923	Б ₉	6,0	
Фестивальная 250/Festivalnaya 250	Фе-250	2422...2438	Б ₁₀	40,0	
Фестивальная 253/Festivalnaya 253	Фе-253	2550...2576	Б ₁₀	2,2	Вода+газ/Water+gas
Ньюльгинская 1/Nyulginская 1	Ню-1	2499...2527	Б ₁₃	5,6	Вода/Water
Игольская 2/Igolskaya 2	Иг-2	2420...2450	Б ₁₂	5,7	
Тальянская 1/Talyanskaya 1	Т-1	2442...2521	Б ₁₂	10,9	
Пешеходная 1 параметрическая Peshekhodnaya 1 parametrical	П-1п	2262...2295	Б ₉	4,4	
		2325...2350	Б ₁₂	5,4	
Глухарина 2/Glukharinaya 2	Глу-2	2199...2204	Б ₈	4,0	
		2230...2234	Б ₉	1,0	
		2298...2301	Б ₁₁	1,0	
Пуглалымская 87/Puglalymskaya 87	Пу-87	2239...2318	Б ₁₀	6,6	
Ключевская 64/Klyuchevskaya 64	Кл-64	2284...2313	Б ₁₀	4,5	
Салатская 1 параметрическая/Salatskaya 1 parametric	Са-1п	2197...2226	Б ₁₁₋₁₂	9,7	
Верхнесалатская 31/Verkhnesalatskaya 31		2110...2114	Б ₁₀	163,5	
Речная 1/Rechnaya 1	Ре-1	2245...2261	Б ₈	4,4	
Речная 280/Rechnaya 280	Ре-280	2318...2323	Б ₁₀	43,2	
Мыльджинская 1/Myldzhinskaya 1	Мы-1	2088...2093	Б ₈	156 тыс./38,4	Газоконденсат/вода Gas condensate/Water

Окончание табл. 2

Table 2

Название площади, номер скважины Area name, well number	Условный индекс скважины (рис. 3, Б) Conventional index of a well (Fig. 3, B)	Интервал (глубина) испытания, м interval (depth) of testing, m	Пласты Layers	Приток, м ³ /сут. Influx, m ³ /day	Тип флюида Fluid type
Мыльджинская 2/Myldzhinskaya 2	Мы-2	2121...2147	Б ₈	37,3	Вода/Water
Мыльджинская 3/Myldzhinskaya 3	Мы-3	2146...2160	Б ₁₀	93,7 тыс.	Газ/Gas
Мыльджинская 4/Myldzhinskaya 4	Мы-4	2073...2095	Б ₁₀	0,9 тыс. / 198,0	Газ/вода/Gas/Condensate
Мыльджинская 17/Myldzhinskaya 17	Мы-17	2223...2240	Б ₁₀	144,0 тыс. / 16,8	Газ/конденсат Gas/Condensate
Мыльджинская 20/Myldzhinskaya 20	Мы-20	2166...2190	Б ₁₀	447,4 тыс. / 43,2	Газ/Gas
Мыльджинская 21/Myldzhinskaya 21	Мы-21	2185...2197	Б ₁₀	217,3 тыс.	
Мыльджинская 24/Myldzhinskaya 24	Мы-24	2097...2148	Б ₈	150,0 тыс.	Газ/конденсат Gas/Condensate
Мыльджинская 34/Myldzhinskaya 34	Мы-34	2228...2241	Б ₁₀	720 тыс. / 68,6	
Мыльджинская 55 параметрическая Myldzhinskaya 55 parametric	Мы-55п	2297...2304	Б ₉	8,8	Вода Water
Южно-Мыльджинская 22/Yuzhno-Myldzhinskaya 22	ЮМ-22	2125...2164	Б ₁₁₋₁₂	56,0/24,0	Нефть/вода Oil/Water
Южно-Мыльджинская 27/Yuzhno-Myldzhinskaya 27	ЮМ-27	2178...2184	Б ₁₀	9,2	Вода Water
		2229...2249	Б ₁₁₋₁₂	9,7	
Южно-Мыльджинская 28/Yuzhno-Myldzhinskaya 28	ЮМ-28	2091...2093	Б ₁₀	5,4	
		2105...2108	Б ₁₁	15,2	
Шингинская 296/Shinginskaya 296	Ши-296	2473...2483	Б ₁₀	33,4	
Шингинская 297/Shinginskaya 297	Ши-297	2415...2443	Б ₁₀	2,5	
Тамбаевская 2/Tambaevskaya 2	Там-2	2220...2239	Б ₈	3,9	
Майская 391/Mayskaya 391	Май-391	2426...2440	Б ₁₀	115	
Водораздельная 1/Vodorazdelnaya 1	Во-1	2400...2406	Б ₁₀	6,2	

* – 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»).

* 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»).

отрицательной, что позволяет учитывать перерывы осадконакопления и денудацию. Для решения одномерной начально-краевой задачи (1)–(3) с разрывными коэффициентами применен метод конечных элементов.

Краевое условие (2) определяется температурой поверхности осадконакопления и задается в виде кусочно-линейной функции векового хода температур на поверхности Земли (палеоклимат).

В случае стационарности глубинного теплового потока q решение обратной задачи определяется из условия

$$\sum_{i=1}^{k_i} (U(Z_i, t, q) - T_i)^2 \xrightarrow{q} \min, \quad (4)$$

где T_i – «наблюдаемые» значения температур в k_i точках на различных глубинах Z_i в моменты времени t . Здесь задача решается в предположении постоянства значения плотности теплового потока из основания начиная с юрского времени. Так, согласно [18], величина коэффициента изменений теплового потока в этот период варьирует в пределах

1,03...1,15. Решение обратной задачи строится с учетом того, что функция $U(Z, t, q)$, являющаяся решением прямой задачи (1) с крайевыми условиями (2) и (3), в этом случае линейно зависит от q . Поэтому неизвестный параметр q определяется однозначно.

Схема расчета палеотемператур состоит из двух этапов. На первом этапе по распределению «наблюдаемых» температур T_i в скважине рассчитывается тепловой поток q через поверхность подстилающего основания, т. е. решается обратная задача геотермии. На втором этапе с известным значением q решается прямая задача геотермии – непосредственно рассчитываются температуры U в заданных точках осадочной толщ Z в заданные моменты геологического времени t . После расчета значения плотности теплового потока из основания осадочного разреза q , являющегося фундаментальным (базовым) параметром, создается и реализуется возможность расчета геотемператур (путем решения прямых задач) в любой точке геологического разреза скважины на любой момент геологического времени.

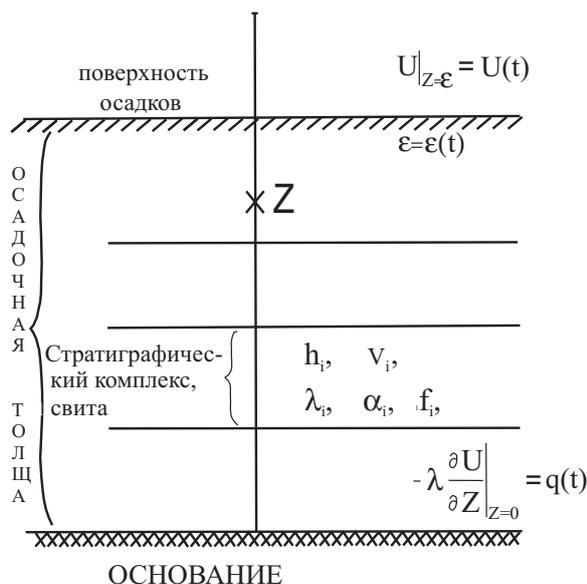


Рис. 4. Схематическое изображение слоистого осадочного разреза при палеотемпературном моделировании: $\varepsilon = \varepsilon(t)$ – верхняя граница осадочной толщи; t – время осадконакопления; U – температура; q – тепловой поток; Z – точки расчета температур; h_i – мощность; v_i – скорость осадконакопления; λ_i – теплопроводность; α_i – температуропроводность; f_i – плотность тепловыделения радиоактивных источников

Fig. 4. Schematic diagram of laminated sedimentary section at paleotemperature modeling: $\varepsilon = \varepsilon(t)$ is the upper boundary of a sedimentation mass; t is the time of sedimentation; U is the temperature; q is the heat flow; Z are the points of temperature calculation; h_i is the power; v_i is the speed of sedimentation; λ_i is the heat conductivity; α_i is the thermal conductivity; f_i is the thermal power density of radioactive sources

Для решения обратной задачи геотермии – определения теплового потока из основания q используем в качестве «наблюденных» как измерения пластовых температур ($\tau=0$), полученные при испытаниях скважин, так и палеотемпературы ($\tau \neq 0$), определенные по отражательной способности витринита (ОСВ) – R_{vt}^0 . В случае использования данных ОСВ указывается время срабатывания «максимального палеотермометра». В табл. 3 приведены пластовые температуры и температуры, определенные по ОСВ, для 39 глубоких скважин. В таблицу включены геотемпературы только для интервалов (глубин) осадочного чехла, использованные в качестве «наблюденных» при решении обратных задач геотермии (4) в разрезах каждой из скважин.

Способ перехода от R_{vt}^0 к соответствующей геотемпературе обоснован вариативными исследованиями и приведен в [19]. Для перехода от R_{vt}^0 к соответствующей геотемпературе используется диаграмма «Линии значений отражательной способности витринита, нанесенные на измененную схему Коннона» [20, 21]. На диаграмме фиксированы линия соответствия $R_{vt}^0=0,5\%$ и температуры 80 °С, линия соответствия $R_{vt}^0=0,8\%$ и температуры 120 °С. При определениях температуры для

промежуточных значений R_{vt}^0 выполняется линейная интерполяция между указанными крайними значениями.

При отсутствии прямых определений теплопроводности λ_i используем петрофизические зависимости теплопроводности осадков от их плотности σ . Эти зависимости получены в интервале плотностей 1.5...2.6 г/см³ как для песчанистых отложений, так и для алевролито-аргиллитовых толщ [22]. Коэффициенты температуропроводности α_i , плотности тепловыделения радиоактивных источников f_i также зависят от породного состава стратиграфических комплексов.

Динамика палеоклимата (векового хода температур на поверхности Земли) – краевое условие (2) – принята с учетом работ [18, 23, 24] и представлена в табл. 4.

Представляет интерес оценка влияния каждого из основных параметров принятой математической модели (1)–(4) на результаты палеотемпературного моделирования. На примере палеогеновых отложений Лунской впадины Сахалина и юрских отложений юго-востока Западной Сибири были исследованы зависимости величины максимума палеотемператур материнских отложений и времени его проявления [25, 26]: от величины плотности теплового потока из основания; от значений теплопроводности, температуропроводности и тепловой мощности радиоактивных источников пород осадочного чехла; от мощностей и скорости осадконакопления стратиграфических подразделений, от темпа и величины их денудации, а также от векового хода температур на поверхности Земли. Изменяемые при исследованиях параметры перекрывали возможный диапазон реальных природных ситуаций.

Установлено, что существенными факторами, влияющими на величину максимума палеотемпературы, являются: 1) величина плотности теплового потока из основания (чем больше плотность теплового потока, тем больше максимум, прямая линейная зависимость); 2) теплопроводность отложений, непосредственно перекрывающих материнскую свиту (чем больше теплопроводность, тем меньше максимум); 3) плотность тепловыделения радиоактивных источников в породах осадочного чехла (их вклад достигает порядка 10 %, прямая линейная зависимость); 4) мощность осадочного чехла (прямая линейная зависимость); 5) скорость осадконакопления, при ее величинах в 5–10 раз превышающих «нормальную», т. е. при «лавинной» седиментации 70...80 м/млн л и более (зависимость обратная нелинейная); 6) наличие перерывов в осадконакоплении, размывов перекрывающих отложений, которые приводят к временной стационарности геотемпературного режима, а в случае денудации – к локальному по времени охлаждению материнской свиты.

Существенными факторами, влияющими на время проявления максимума палеотемпературы, являются: 1) теплопроводность перекрываю-

Таблица 3. Пластовые температуры, измеренные при испытаниях глубоких скважин, и палеотемпературы, определенные по ОСВ (R_{vr}^0) в образцах керны**Table 3.** Reservoir temperatures changed when testing deep wells and paleotemperatures determined by vitrinite reflectance (VR) (R_{vr}^0) in core samples

Скважина Well	Условный индекс скважины (рис. 1, А) Conventional index of a well (Fig. 1, A)	Пластовые температуры Reservoir temperatures		Температуры по ОСВ Temperatures by VR		
		Интервал (глубина), м Interval (depth), m	Температура пластовая, °С Reservoir temperature*, °C	Глубина, м Depth, m	R_{vr}^0 **%	Палеотемпература по R_{vr}^0 , °С Paleotemperature by R_{vr}^0 , °C
Айсазская 1/Ayzakskaya 1	Ай-1	862	31	2700	0,62	96
		2156	67	3150	0,76	115
Арчинская 40/Archinskaya 40	Ар-40	–	–	2820	0,64	99
				2890	0,65	100
Водораздельная 1/Vodorazdelnaya 1	Во-1	2400...2406	74	2882	0,67	102
		2650...2660	80	2991	0,70	106
Глухарина 1/Glukharinaya 1	Глу-1	2569...2574	100	2539	0,76	115
				2613	0,76	115
Глуховская 2/Glukhovskaya 2	Гл-2	2928...2950	108	–	–	–
		2932...2948	107			
		2962...2967	107			
Гордеевская 1 параметрическая Gordeevskaya 1parametric	Го-1п	–	–	2874	0,80	120
Двуреченская 15/Dvurechenskaya 15	Дв-15	2689...2692	83	2684	0,59	92
		2682...2684	89	2686	0,58	91
Еллейская 2/Elleyskaya 2	Ел-2	2632...2640	84	2727	0,73	111
		2650...2657	85			
Западно-Моисеевская 31 Zaradno-Moiseevskaya 31	ЗМ-31	2713...2718	85	2706	0,58	91
				2713	0,59	92
Западно-Крапивинская 223 Zaradno-Krapivinskaya 223	ЗК-223	2756...2759	92	2746	0,59	92
		2748...2753	92			
Западно лугинецкая 183 Zaradno Luginetskaya 183	ЗЛ-183	2660...2664	95			
Заячья 50/Zayachya 50	За-50	–	–	2835	0,75	114
				2840	0,80	120
Игольская 2/Igolskaya 2	Иг-2	2750...2823	92	2800	0,70	106
		2740...2773	95			
Колотушная 262 параметрическая Kolotushnaya 262 parametric	Ко-262п	2584...2593	90	–	–	–
Кулгинская 141/Kulginskaya 141	Ку-141	2753...2763	84	2661	0,67	102
		2660...2662	82	2676	0,68	104
		2791...2795	86			
Лонтынь-Яхская 63 Lontyn-Yakhskaya 63	ЛЯ-63	2476...2483	95	–	–	–
Мыльджинская 62/Myldzhinskaya 62	Мы-62	2368...2380	84	2360	0,53	84
Налимья 3/Nalimya 3	На-3	2885...2891	98	2917	0,76	115
				3282	0,80	120
Нюльгинская 1/Nyulginskaya 1	Ню-1	2499...2527	75	2700	0,52	83
				2894	0,60	94
				3199	0,62	96
Пешеходная 1 параметрическая Peshekhodnaya 1parametric	П-1п	2262...2295	71	2800	0,59	92
		2325...2350	73			
Пуглалымская 86/Puglalymskaya 86	Пу-86	2630...2703	90	2677	0,76	115
Речная 280/Rechnaya 280	Ре-280	2156...2178	67	2911	0,68	104
		2318...2323	68			
Салатская 1 параметрическая Salatskaya 1parametric	Са-1п	–	–	2640	0,58	91
				2962	0,73	111
Северо-Айсазская 1/Severo-Aysazskaya 1	СА-1	2840...2850	94	–	–	–
Северо-Фестивальная 1 Severo-Festivalnaya 1	СФ-1	3130...3145	118	–	–	–
		3145...3165	123			
Северо-Юлжавская 2 Severo-Yulzhavskaya 2	СЮ-2	2674...2707	78	2800	0,59	92

Окончание табл. 3

Table 3.

Скважина Well	Условный индекс скважины (рис. 1, А) Conventional index of a well (Fig. 1, A)	Пластовые температуры Reservoir temperatures		Температуры по ОСВ Temperatures by VR		
		Интервал (глубина), м Interval (depth), m	Температура пластовая*, °С Reservoir temperature*, °C	Глубина, м Depth, m	$R_{vr}^{* \%}$	Палеотемпература по $R_{vr}^{* \%}$, °С Paleotemperature by $R_{vr}^{* \%}$, °C
Таловая 1/Talovaya 1	Та-1	2798...2806 2781...2787	88 88	2760	0,59	92
Тальянская 1/Talyanskaya 1	Т-1	2442...2521	82	-	-	-
Тамбаевская 1/Tambaevskaya 1	Там-1	2984...3008 2936...2957 2754...2762 2593...2597	100 98 87 84	2590	0,62	96
Тамратская 1 параметрическая Tamratskaya 1 parametric	Т-1п	2853...2860	107	2885	0,73	111
Федюшкинская 4/Fedyushkinskaya 4	Фед-4	2838...2842 3064...3069	92 99	-	-	-
Фестивальная 255/Festivalnaya 255	Фе-255	-	-	2793 3122 3159	0,66 0,80 0,80	101 120 120
Чагвинская 1/Chegvinskaya 1	Ча-1	2641...2647	88	2600 2645	0,62 0,67	96 102
Чворовая 1/Chvorovaya 1	Чв-1	2744...2776 2765...2772	97 97	2917	0,76	115
Шахматная 1/Shakhmatnaya 1	Ша-1	2450...2468 2494...2502	87 89	2452	0,59	92
Шингинская 296/Shinginskaya 296	Ши-296	2473...2483 2704...2709 2737...2748	93 102 105	2713	0,70	106
Южно-Черемшанская 337 Yuzhno-Cheremshanskaya 337	ЮЧ-337	2686...2707 2812...2820	98 103	-	-	-
Южно-Фестивальная 1 параметрическая Yuzhno-Festivalnaya 1 parametric	ЮФ-1п	2790...2820	90	2844 2917 3059	0,67 0,72 0,70	102 109 106
Южно-Пионерская 263 Yuzhno-Pionerskaya 263	ЮП-263	-	-	2663 2707	0,76 0,76	115 115

* – Данные испытаний глубоких скважин изучены и сведены из первичных «дел скважин», отчетов по подсчету запасов, из отчетов оперативного анализа и обобщения геолого-геофизических материалов по Томской области (материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО»). ** – ОСВ определены в Лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск).

* The deep well tests data were 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»). ** VR is determined in the Laboratory of oil and gas geochemistry at the Institute of oil-and-gas geology and geophysics SB RAS (Novosibirsk).

щих отложений (чем больше величина теплопроводности, тем «древнее» палеотемпературный максимум); 2) наличие размывов перекрывающих отложений (размывы могут обуславливать абсолютный и несколько относительных максимумов палеотемпературы в геологическом прошлом); 3) увеличение скоростей осадконакопления, которые «омолаживают» максимум палеотемпературы.

Установлено [26, 27], что вековой ход температур земной поверхности (палеоклимат) – краевое условие (2) модели распространения тепла – также оказывает существенное влияние на термический режим глубоководных материнских отло-

жений. Наибольшее влияние на формирование геотемператур материнской свиты оказывает изменение климатических условий (похолодание) в олигоцен-раннечетвертичное время (37,6 – 0,5 млн лет назад). Резкое похолодание в позднечетвертичное время (0,25 – 0,03 млн лет назад) не столь значительно снижает геотемпературы материнской свиты, однако, на некоторых участках может «вывести» свиту из ГЗН.

Интересно отметить [28] кажущуюся синхронность изменения геотемператур глубоководной материнской свиты и палеоклимата (векового хода температуры на земной поверхности). Однако

Таблица 4. Расчетные геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Водораздельная 1 (рис. 1, А, табл. 3)**Table 4.** Design geotemperatures of Bazhenov formation in the section of Vodorzadelnaya 1 well (Fig. 1, A, Table 3)

Время*, млн лет назад Time*, million years ago	Вековой ход температуры на поверхности Земли, °C Temperature secular trend on the Earth surface, °C	Глубина кровли отложений баженовской свиты, м Depth of the top of Bazhenov formation deposits, m	Геотемпературы отложений баженовской свиты, °C Geotemperatures of deposits of Bazhenov formation
0	0	2590	81
0,03	-4	2590	80
0,07	-4	2589	81
0,11	-4	2589	81
0,19	-8	2588	81
0,235	-10	2587	82
0,245	0	2587	83
0,5	2	2584	84
1,64	3	2571	84
3	3	2571	85
4,71	4	2570	86
5	4	2570	86
10	7	2562	91
15	10	2554	91
20	7	2546	88
24,0	4	2540	85
30	8	2419	84
32,2	10	2398	85
35	13	2358	87
37,6	20	2344	93
40	20	2331	93
41,7	20	2322	93
45	21	2297	92
50	21	2259	91
54,8	20	2223	90
61,7	20	2222	89
73,2	20	2084	84
86,5	20	2032	82
89,8	20	1896	78
91,6	20	1879	75
98,2	21	1569	67
114,1	21	822	45
116,3	20	821	45
120,2	20	820	45
132,4	20	361	32
136,1	20	268	29
142,2	22	100	25
145,8	22	26	23
Расчетный тепловой поток из основания осадочного разреза, мВт/м ² Design thermal flow from the base of sedimentary section, mW/m ²			45

* – соответствует временам начала/завершения формирования каждой свиты и точкам «излома» векового хода температур на земной поверхности. Коричневой заливкой обозначены времена палеотемпературного максимума в баженовской свите, синей заливкой – температуры главной зоны нефтеобразования (преимущественно сапропелевый тип РОВ).

* corresponds to time of beginning/end of formation of each strata and to the «salient» points of temperature secular trend on the Earth surface. Brown – times of paleotemperature maximum in Bazhenov formation, blue – temperatures of the main oil generation zone (mainly the sapropelic type of dispersed organic matter).

эта синхронность наблюдается лишь при шаге дискретизации геологического времени в 2...3 млн лет. При детальном шаге дискретизации проявляется инерционность геотемператур материнских свит к изменению палеоклимата – олигоцен-четвертичное тепловое «охлаждение» с дневной поверхности достигает материнской свиты не раньше, чем через 0,3...0,5 млн л.

Картирование очагов генерации баженовских нефтей

На рис. 1, Б приведена схематическая карта 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 39 глубоких скважин (рис. 1, А).

В качестве «наблюденных» использованы пластовые температуры, замеренные при испытании скважин, и палеотемпературы, определенные из ОСВ. Сопоставление «наблюденных» геотемператур в скважинах (табл. 3) и расчетных (в тех же точках геологического разреза в те же моменты геологического времени) показало, что выполняется один из основных критериев оптимальности модели – критерий «невязки» [29]. «Невязки» решений обратных задач (4) для каждой скважины – среднеквадратические отклонения расчетных значений от «наблюденных» – составляли порядка ± 2 °C. Такие «невязки» оптимальные, т. к. «наблюденные» геотемпературы имеют погрешность порядка ± 2 °C.

В качестве примера выполнения критерия «невязки» решения обратной задачи геотермии в табл. 5 приводятся результаты по скважине Водораздельная 1 (рис. 1, А, условный индекс Во-1; табл. 3).

Таблица 5. Сопоставление «наблюденных» и расчетных геотемператур при палеотемпературном моделировании разреза скважины Водораздельная 1 (рис. 1, А, табл. 3)**Table 5.** Comparison of the «observed» and design geotemperatures at paleotemperature modeling of Vodorzadelnaya 1 well section (Fig. 1, A, Table 3)

Интервал (глубина), м Interval (depth), m	«Наблюденные» температуры, °C «Observed» temperatures, °C	Способ «наблюдения» Method of «observation»	Сопоставление геотемператур Comparison of geotemperatures		Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м ² Design thermal flow from the base, mW/m ²
			Расчетные температуры Design temperatures	Разница Difference	
2400...2406	74	Пластовые Tabular	75	+1	45
2650...2660	80		82	+2	
2882	102	По ОСВ by VR	101	-1	
2991	106		104	-2	
Среднеквадратическое отклонение, °C Standard deviation, °C				±2	

Таблица 6. Параметры осадочной толщи, вскрытой скважиной Водораздельная 1 (рис. 1, А, табл. 3)**Table 6.** Parameters of sedimentation mass tapped by the well Vodorazdelnaya 1 (Fig. 1, A, Table 3)

Свита, толща* (стратиграфия) Strata, formation* (stratigraphy)	Мощность*, м Capacity*, m	Возраст** Age**	Время накопления Accumulation time	Плотность***, г/см ³ Density***, g/cm ³	Теплопроводность, Вт/м·град Thermal conductivity, W/m·deg	Температуропроводность, м ² /с Temperature conductivity, m ² /s	Тепловыделение, Вт/м ³ Heat extraction, W/m ³
		млн лет million years					
Четвертичные Q Quaternary Q	19	0...1,64	1,64	2,02	1,27	6,5e-007	1,1e-006
Плиоценовые N ₂ Pleistocene N ₂	–	1,64...4,71	3,07	–	–	–	–
Миоценовые N ₁ Miocene N ₁	30	4,71...24,0	19,29	2,07	1,31	6,5e-007	1,1e-006
Некрасовская nk Pg ₃ Nekrasovskaya nk Pg ₃	168	24,0...32,2	8,3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Чеганская hg Pg ₃₋₂ Cheganskaya hg Pg ₃₋₂	50	32,2...41,7	9,4	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Люлинворская ll Pg ₂ Lyulinvorskaya ll Pg ₂	99	41,7...54,8	13,1	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Талицкая tl Pg ₁ Talitskaya tl Pg ₁	–	54,8...61,7	6,9	–	–	–	–
Ганькинская gn Pg _{1-K2} Gankinskaya gn Pg _{1-K2}	138	61,7...73,2	11,5	2,11	1,37	7e-007	1,25e-006
Славгородская sl K ₂ Slavgorodskaya sl K ₂	48	73,2...86,5	13,3	2,11	1,37	7e-007	1,25e-006
Ипатовская ip K ₂ Ipatovskaya ip K ₂	140	86,5...89,8	3,3	2,18	1,4	7e-007	1,25e-006
Кузнецовская kz K ₂ Kuznetsovskaya kz K ₂	17	89,8...91,6	1,8	2,18	1,43	8e-007	1,25e-006
Покурская pk K ₁₋₂ Pokurskaya pk K ₁₋₂	1057	91,6...114,1	22,5	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Алымская a ₂ K ₁ Alymskaya a ₂ K ₁	–	114,1...116,3	2,2	–	–	–	–
Алымская a ₁ K ₁ Alymskaya a ₁ K ₁	–	116,3...120,2	3,9	–	–	–	–
Киялинская kls K ₁ Kiyalinskaya kls K ₁	459	120,2...132,4	12,2	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Тарская tr K ₁ Tarskaya tr K ₁	93	132,4...136,1	3,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Куломзинская klm K ₁ Kulomzinskaya klm K ₁	268	136,1...145,8	9,7	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская bg J ₃ Vazhenovskaya bg J ₃	26	145,8...151,21	5,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Георгиевская gr J ₃ Georgievskaya gr J ₃	12	151,2...156,6	5,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Васюганская vs J ₃ Vasyuganskaya vs J ₃	62	156,6...162,9	6,3	2,42	1,6	8e-007	1,3e-006
Тюменская tm J ₁₋₂ Tyumenskaya tm J ₁₋₂	313	162,9...	45,1	2,46	1,64	8e-007	1,3e-006

* – Данные литолого-стратиграфических разбивок глубоких скважин изучены и сведены из первичных «дел скважин», из каталога (В.И. Волков, 2001) литолого-стратиграфических разбивок скважин (материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО»); ** – В качестве основы использована Шкала геологического времени У. Харленда с соавторами [30]; *** – Литология и плотность пород выделенных свит и толщ приняты по материалам обобщения петрофизических определений керна и сейсмического каротажа, приведенным в диссертационной работе «Гравиразведка в комплексе с геологическим и сейсмическим исследованием Нюрольского прогиба в связи с поисками нефти и газа в палеозойских отложениях» (С.Ф. Богачев, 1987).

* the data of lithologic and stratigraphic arrangements of deep wells were studied and linked from the «well file», from the catalogue (V.I. Volkov, 2001) of wells lithologic and stratigraphic arrangements (materials of Tomsk branch of «Territorial fund of geological information in SFD»); ** based on geological time scale of W. Harlend with co-authors [30]; *** lithology and density of the rocks in the stratas and formations singled out were taken by the materials of generalization of core-sample petrophysical test and seismic well logging given in thesis work «Gravity survey in conjunction with geological and seismic investigations of Nyurolsk depression at oil and gas exploration in Paleozoic deposits» (S.F. Bogachev, 1987)

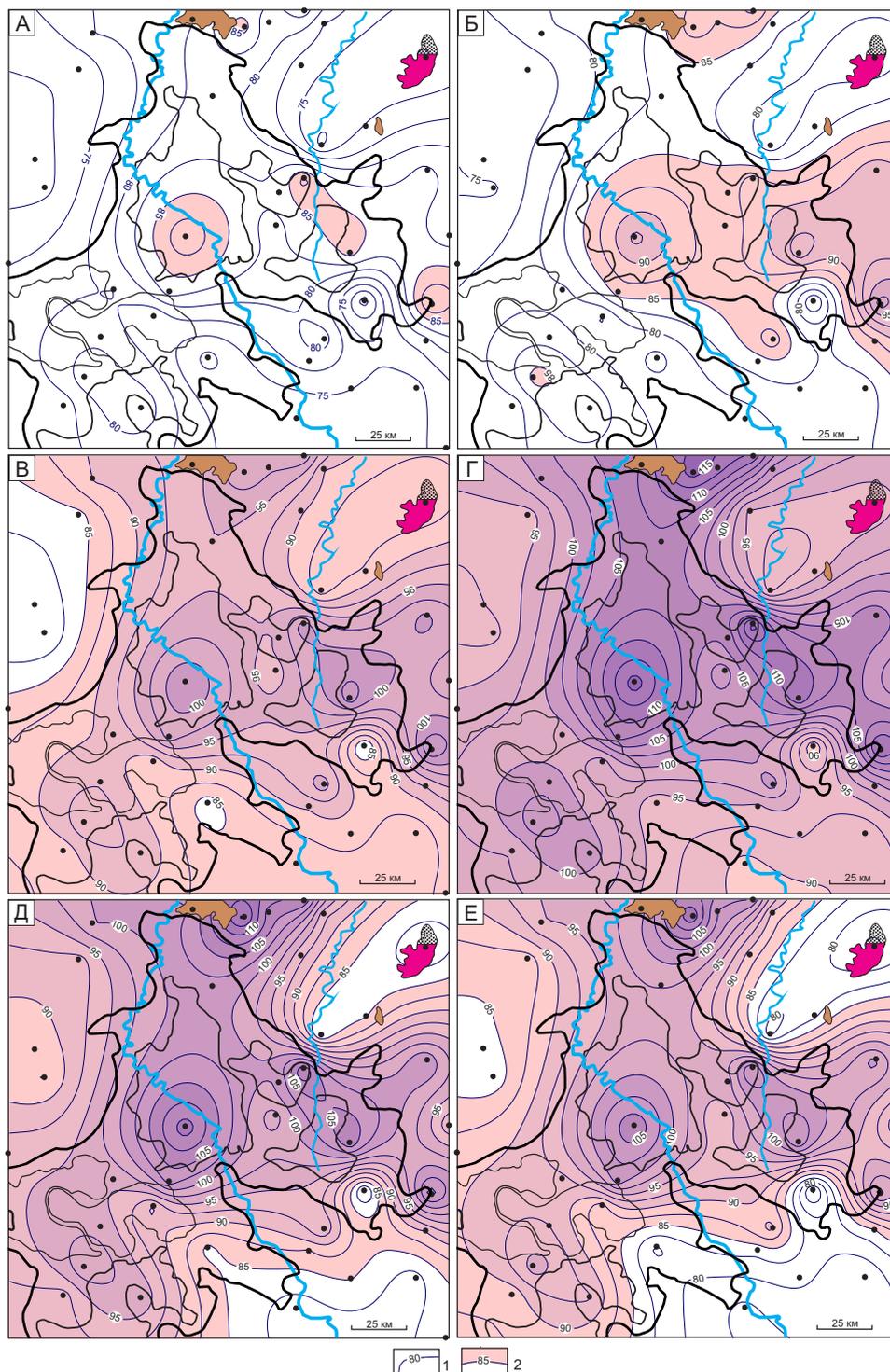


Рис. 5. Схематические карты распределения геотемператур и положения очагов интенсивной генерации баженовских нефтей 91,6 млн лет назад, конец формирования покурской свиты $K_{1-2}pk$ (А); 86,5 млн лет назад, конец формирования ипатовской свиты K_2ip (Б); 61,7 млн лет назад, конец формирования ганькинской свиты Pg_1-K_2gn (В); 37,6 млн лет назад, формировании чеганской свиты $Pg_{3-2}hg$ (Г); 24,0 млн лет назад, конец формирования некрасовской свиты $Pg_{3n}nk$ (Д), современный разрез (Е): 1) геоизотерма, °С; 2) контур очага. На картах показаны месторождения с залежами УВ в резервуарах неокома. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 5. Contour maps of geotemperatures distribution and places of Bazhenov oil intensive generation chamber 91,6 million years ago, the end of formation of pokurskaya strata $K_{1-2}pk$ (A); 86,5 million years ago, the end of formation of Ipatovskaya strata K_2ip (B); 61,7 million years ago, the end of formation of Gankinskaya strata Pg_1-K_2gn (B); 37,6 million years ago, formation of Cheganskaya strata $Pg_{3-2}hg$ (Г); 24,0 million years ago, the end of formation of Nekrasovskaya strata $Pg_{3n}nk$ (Д), contemporary section (E): 1) geoisotherm, °C; 2) chamber outline. The maps demonstrate the fields with hydrocarbon deposits in Neocomian reservoirs. The same symbols as in Fig. 1

Пример параметризации осадочного разреза, вскрытого глубокой скважиной, определяющей параметры седиментационной и теплофизической модели (1)-(3), приведен в табл. 6. Возраст пород и соответствующие вековые интервалы шкалы геологического времени [30], увязанные с периодами геохронологической шкалы Стратиграфического кодекса (1992 г.), определяют время и скорости осадконакопления стратиграфических комплексов.

На втором этапе исследований в моделях восстановлена термическая история баженовских отложений на моменты начала/завершения формирования свит меловой и палеоген-четвертичной систем. На эти ключевые времена, путем интерполяции геотемператур в разрезах скважин, построены схематические карты *распределения геотемператур отложений баженовской свиты* (рис. 5). По геотемпературному критерию выделены *очаги интенсивной генерации баженовских нефтей*. Учитывая, что РОВ баженовской свиты сапропелевого типа, пороговая температура, определяющая границу очага генерации нефтей, принята 85 °С.

Первые очаги генерации нефти появились 91,6 млн лет назад (конец формирования покурской свиты K_{1-2pk}) в южной части Кулан-Игайской впадины, в восточных частях Фестивального вала и Тамрадской впадины, в зонах сочленения депрессии с обрамляющими положительными структурами (рис. 5, А). Через 5 млн лет (конец формирования ипатовской свиты K_{2ip}) очаги объединились, охватив центральную и восточную части исследуемой территории (рис. 5, Б). В течение последующих 25 млн лет (конец формирования ганькинской свиты Pg_1-K_2gn) продолжалась «работа» очагов, увеличивалась их площадь (рис. 5, В). Максимальный прогрев осадочной толщи произошел при формировании чеганской свиты Pg_{3-2hg} 37,6 млн лет назад (рис. 5, Г). Конец формирования некрасовской свиты Pg_3nk (рис. 5, Д) иллюстрирует начало охлаждения осадочного разреза, вызванное изменением климатических условий в олигоцене, которое продолжается до настоящего времени (рис. 5, Е).

Оценка относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей

Для оценки величины плотности ресурсов генерированных нефтей в каждой из 39-ти скважин для материнских баженовских отложений рассчитан условный интегральный показатель (R) по формуле:

$$R = \sum_{i=1}^n (U_i t_i \cdot 10^{-2}), \quad (5)$$

где U_i – расчетная геотемпература очага генерации нефти (ГЗН), °С; t_i – интервальное время действия очага – нахождения материнских отложений в ГЗН, млн лет; количество временных интервалов n определено числом интервалов геологического времени нахождения материнских отложений в ГЗН. Множитель 10^{-2} применен для подходящего

заглубления результатов оценки, представляемых в целочисленном интервале 20...100 усл. ед.

Как следует из формулы (5) изменение плотности генерированных ресурсов (на участке скважины) напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН. В данном случае плотность генерированных ресурсов имеет размерность [°С·млн л]. Эту единицу оценки мы называем условной.

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 [31–33]. Такой подход к оценке плотности генерированных ресурсов позволяет достаточно просто определить пространственно-временную локализацию очагов генерации и эмиграции УВ. Оценка плотности ресурсов выполняется в условных единицах, что представляется корректным для последующего площадного районирования.

При оценке плотности генерированных ресурсов (5) не учитывается площадное распределение органического углерода $C_{орг}$. Такая условность представляется допустимой, т. к., согласно прогнозной карте В.А. Конторовича [14], содержание органического вещества в баженовских отложениях на территории наших исследований варьирует в интервале 9...12 %. Причем максимальные концентрации $C_{орг}$ картируются В.А. Конторовичем на участках, где по нашему условному прогнозу (рис. 6) картируется высокая и максимальная плотность ресурсов генерированных баженовских нефтей. Таким образом, наш условный прогноз, если принять во внимание площадное распределение $C_{орг}$, не изменяется.

Районирование ачимовского и шельфового резервуаров по плотности ресурсов

Путем интерполяции значений условного интегрального показателя R построена схематическая карта *распределения плотности генерированных баженовских нефтей* (рис. 6).

Учитывая суммарные толщины отложений ачимовских и мелководно-шельфовых отложений неоккома (рис. 2, Б и 3, Б) построены карты *распределения относительной плотности баженовских нефтей* ачимовского и шельфового резервуаров (рис. 7).

Карты (рис. 7) построены путем «перемножения» карт распределения суммарных толщин резервуаров и карты распределения плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей. Здесь, наряду с распределением объемов генерированных нефтей, учитывается распределение аккумуляющих объемов резервуара, обусловленных его толщинами. Распределения мощностей резервуаров и распределение плотности генерирован-

ных ресурсов учитываются с одинаковым весовым коэффициентом.

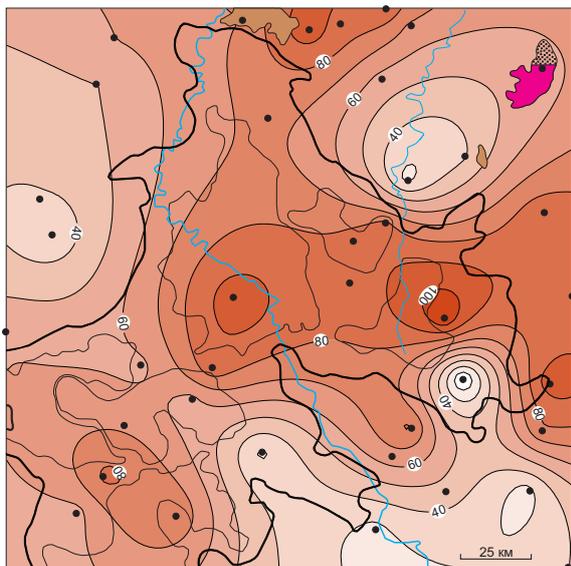


Рис. 6. Схематическая карта распределения плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей Нюрольской мегавпадины. Значение изолинии в условных единицах. Показаны месторождения с залежами УВ в резервуарах неокома. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 6. Contour map of resource distribution of generated Bazhenov oil in Nyuro'l'ka megadepression. Values of isolines are in arbitrary units. The Figure demonstrates the fields with hydrocarbon deposits in Neocomian reservoirs. The rest symbols are the same as in Fig. 1

Карты названы схематическими картами распределения *относительной* плотности ресурсов. Здесь относительная плотность ресурсов понимается так. Если на участке скважины Фестивальная 253 (Фе-253) плотность ресурсов шельфового резервуара оценена в 75 усл. ед., а на участке скважины Игольская 2 (Иг-2) – в 20 усл. ед. (рис. 7Б), то это значит, что на первом участке прогнозируемая плотность ресурсов шельфового резервуара в 4 раза больше, чем плотность ресурсов на втором участке (*отношение 4:1*).

Районирование ачимовского резервуара (рис. 8). Проведенные исследования показывают определенный *диссонанс* распределения толщин ачимовских отложений (рис. 2, Б) и распределения плотности генерированных баженовских нефтей (рис. 6). На участках наиболее интенсивной генерации нефтей отмечается выклинивание ачимовского коллектора.

В районе Мыльджинского месторождения, где картируется повышение плотности ресурсов УВ, открыта залежь газоконденсата в ачимовских отложениях (рис. 8). Полагаем, что этот район изучался детальнее других.

Земли юго-восточного склона Каймысовского свода, зона сочленения Чузыкско-Чижапской и Шингинской мезоседловин, 30-километровая полоса субмеридиального простирания в центральной части Нюрольской мегавпадины могут быть рекомендованы для первоочередного изучения нефтегазоносности ачимовского резервуара.

Районирование шельфового резервуара (рис. 9) провели путем выделения на карте (рис. 7, А) зна-

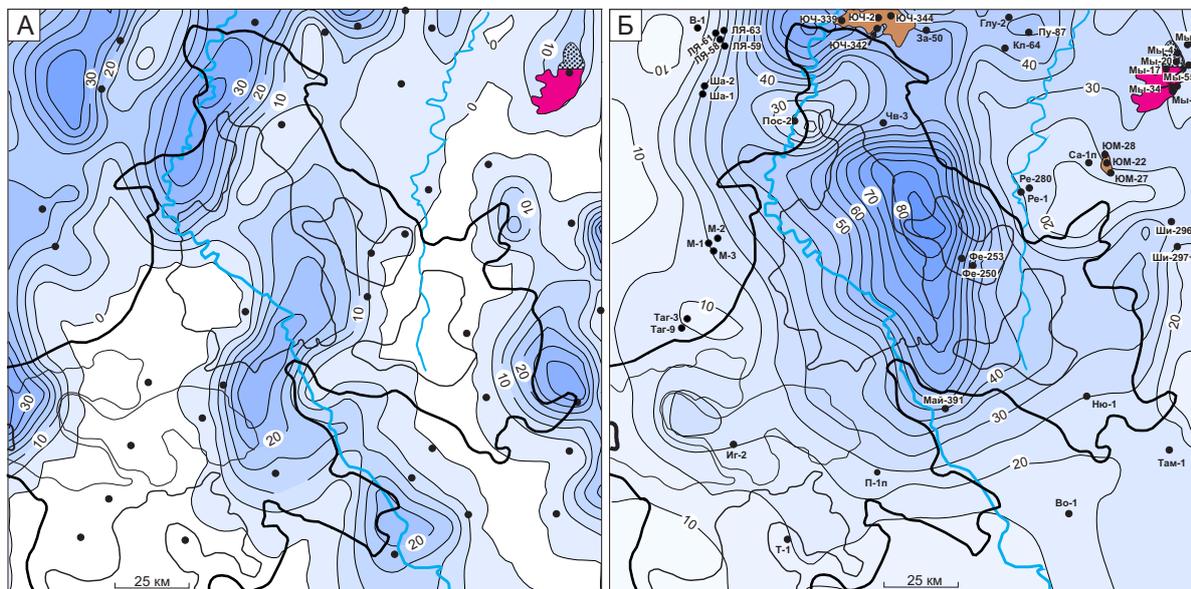


Рис. 7. Схематические карты распределения относительной плотности ресурсов баженовских нефтей в клиноформных отложениях (А), в мелководно-шельфовых отложениях неокома Нюрольской мегавпадины. Значение изолинии в условных единицах. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2 и 3

Fig. 7. Contour map of relative density distribution of Bazhenov oil resources in clinoform deposits (A), in shallow-shelf sediments (B) of Neocomian Nyuro'l'ka megadepression. Values of isolines are in arbitrary units. The rest symbols are the same as in Fig. 2, 3

чений относительной плотности ресурсов, превышающих 50 условных единиц.

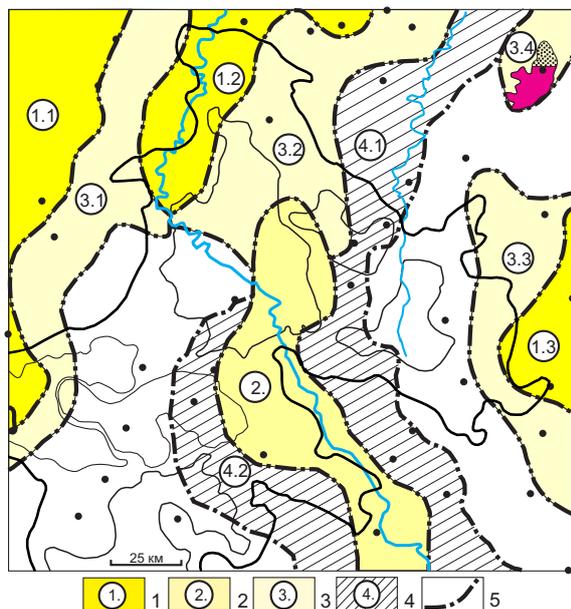


Рис. 8. Схема районирования ачимовского резервуара неокома Нюрольской мегавпадины по относительной плотности ресурсов баженовских нефтей. 1-4 – районы (номер ранжирования; диапазон значений плотности ресурсов, усл. ед.): 1 – 20...35, 2 – 15...25, 3 – 5...20, 4 – менее 5; 5) границы районов. Показано Мыльдзинское месторождение с газоконденсатной залежью в ачимовских отложениях. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2

Fig. 8. Diagram of zoning Achimovsk reservoir of Neocomian Nyurol'ka megadepression by relative density of Bazhenov oil resources. 1-4) are the regions (ranking number; resource density value range, arbitrary units): 1 – 20...35, 2 – 15...25, 3 – 5...20, 4 – less than 5; 5) region boundaries. The diagram demonstrates Myldzhinskoe deposit with gas-condensate reservoir in Achimovka deposits. The rest symbols are the same as in Fig. 2

Полученная схема фиксирует две наиболее перспективные зоны: *первая зона* – район меридионального простирания (площадь порядка 3500 км²), охватывающий восточную половину Кулан-Игайской впадины и западную часть Фестивального вала; *вторая зона* – район сочленения северного борта Нюрольской мегавпадины с восточным склоном Каймысовского свода и юго-западным склоном Среднеvasюганского мегавала (площадь около 500 км²).

Первая перспективная зона практически не изучена глубоко бурением. Только в восточной части, где расположено Фестивальное месторождение (рис. 1, А и 3, Б, условные индексы скважин Фе-255, Фе-253 и Фе-250), в нижнемеловых отложениях испытано лишь по одному объекту в двух скважинах (табл. 2). К юго-западу, в непосредственной близости от выделенной зоны, находится Глуховское месторождение нефти верхнеюрского НГК (рис. 1, А, условный индекс скважины Гл-2). Здесь не проведено ни одного испытания нижнемеловых объектов.

К северу от выделенной зоны расположено Чворовое месторождение нефти верхнеюрского НГК (рис. 1, А и 3, Б, условные индексы скважин Чв-1 и Чв-3). Здесь испытан только один объект в неокоме (табл. 2).

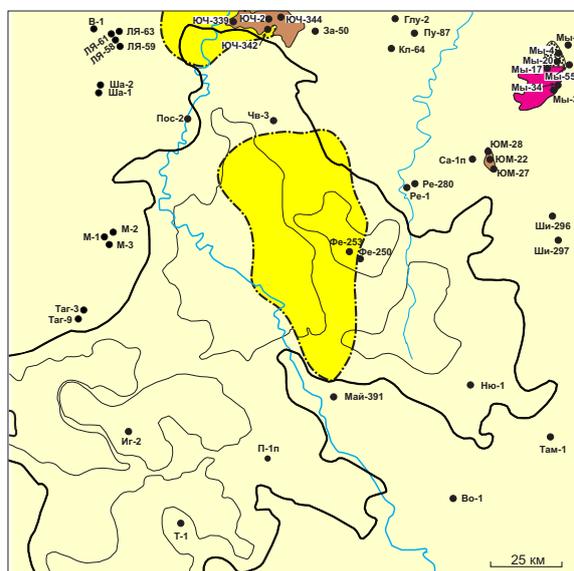


Рис. 9. Схема районирования шельфового резервуара неокома Нюрольской мегавпадины по относительной плотности ресурсов баженовских нефтей. Яркой заливкой показаны две наиболее перспективные зоны. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 3

Fig. 9. Diagram of zoning shelf reservoir of Neocomian Nyurol'ka megadepression by relative density of Bazhenov oil resources. Two most prospective zones are colored bright. The rest symbols are the same as in Fig. 3

В пределах выделенной второй перспективной зоны расположено Южно-Черемшанское месторождение (рис. 1, А), с утвержденными запасами нефти и газа в пластах шельфового резервуара (табл. 1).

В остальных частях территории исследований, менее перспективных по проведенной оценке (рис. 9), меловой НГК разрабатывается на Мыльджинском месторождении (газоконденсат) и на Южно-Мыльджинском месторождении (нефть и газ). На Мыльджинском месторождении источником газа мелового НГК возможно также является баженовская свита в период своего нахождения в верхней зоне газообразования при условии локально сформированных «зрелых» меловых флюидопоров [34]. В отношении меловых залежей нефти Южно-Мыльджинского месторождения можно предположить, что их источником является материнская тогурская свита, выклинивающаяся здесь по восстанию (рис. 1, А).

Заключение

Комплексный подход к изучению территории исследований – анализ геологического строения, седиментационной истории нефтегазоносных комплексов и термической истории материнских отло-

жений, выделение резервуаров однотипных по генезису отложений, картирование очагов интенсивной генерации и эмиграции нефтей – позволил оценить перспективы ачимовского (клиноформного) и шельфового (ундаформного) резервуаров неокома Нюрольской мегавпадины.

Районирование резервуаров по относительной плотности ресурсов определяет первоочередные зо-

ны для проведения поисковых работ в нижнемеловых отложениях Нюрольской мегавпадины. Это главным образом зоны западной части Фестивального вала и юго-восточной части Кулан-Игайской впадины.

Авторы благодарят В.Б. Белозерова за внимательную проработку статьи и замечания, способствующие улучшению понимания и аргументации выводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович В.А., Лапковский В.В., Лунев Б.В. Модель формирования неокомского клиноформного комплекса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с учетом изостазии // Геология нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 65–72.
2. Захрямина М.О. Принципиальная модель строения ачимовской толщи Сургутского и Нижневартовского сводов и ее взаимоотношение с шельфовыми пластами неокома // Геология нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 58–63.
3. Курчиков А.Р., Бородкин В.Н. Стратиграфия и палеогеография берриас-нижнеапских отложений Западной Сибири в связи с клиноформным строением разреза // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 8. – С. 1093–1106.
4. Мельник И.А., Ерофеев Л.Я. Физико-геохимическая модель низкоомного коллектора и ее практическое применение // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 3. – С. 46–50.
5. Жильцова А.А., Исаев В.И., Коржов Ю.В. Вертикальная геохимическая зональность нефтегазоносных комплексов (на примере Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 69–82.
6. Распределение ароматических углеводородов в разрезе отложений нефтегазоносных комплексов (на примере месторождений Краснотенинского свода) / Ю.В. Коржов, В.И. Исаев, А.А. Жильцова, О.В. Латыпова // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 1. – С. 113–129.
7. Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И. Кероген: методы изучения, геохимическая интерпретация. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2005. – 254 с.
8. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2011. – 331 с.
9. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженновской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
10. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование процессов генерации и эмиграции углеводородов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 104–110.
11. Баталин О.Ю., Вафина Н.Г. Температура и глубина образования нефти // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 11. – С. 53–61.
12. Осипова Е.Н., Лобова Г.А. Геотемпературный режим баженновской свиты и нефтеперспективные зоны меловых отложений (Нюрольская мегавпадина) // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 51–56.
13. Костырева Е.А. Геохимия и генезис палеозойских нефтей юго-востока Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 183 с.
14. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
15. Даненберг Е.Е., Белозёров В.Б., Брылина Н.А. Геологическое строение и нефтегазоносность верхнеюрско-нижнемеловых отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты (Томская область). – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 291 с.
16. Нижнемеловые отложения Томской области (геологическое районирование) / Н.А. Брылина, Л.И. Каменьникова, В.А. Москаленко, Т.Н. Шатилова // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск: ГалаПресс, 2000. – Т. 1. – С. 231–233.
17. 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.
18. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазоносность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.
19. Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuro'l'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2006. – V. 47. – № 6. – P. 734–745.
20. Connan J. Time-temperature relation in oil genesis // AAPG Bull. – 1974. – V. 58. – P. 2516–2521.
21. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. – М.: Мир, 1982. – 704 с.
22. Компьютерная технология комплексной оценки нефтегазового потенциала осадочных бассейнов / В.И. Исаев, Р.Ю. Гуленок, О.В., Веселов А.В. Бычков, Ю.Г. Соловейчик // Геология нефти и газа. – 2002. – № 6. – С. 48–54.
23. Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 134 с.
24. Шарбатян А.А. Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии. – М.: Наука, 1974. – 123 с.
25. Isaev V.I. Paleotemperature modelling of the sedimentary section, and oil-and-gas generation // Geology of the Pacific Ocean. – 2004. – V. 23. – № 5. – P. 101–115.
26. Нефтегазоносность центральной части Югорского свода / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, М.Э. Рояк, А.Н. Фомин // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31. – № 2. – С. 15–46.
27. Влияние палеоклимата на геотермический режим и нефтегенерационный потенциал баженновской свиты (Нюрольская мегавпадина) / Г.А. Лобова, Е.Н. Осипова, К.А. Криницына, Ю.Г. Останкова // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 45–50.
28. Исаев В.И., Искоркина А.А. Мезозойско-кайнозойский ход температур на поверхности Земли и геотермический режим юрских нефтематеринских отложений (южная палеоклиматическая зона Западной Сибири) // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. – № 5. – С. 64–80.
29. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – Киев: Наук. думка, 1978. – 228 с.
30. Шкала геологического времени / У.Б. Харленд, А.В. Кокс, П.Г. Ллевеллин, К.А.Г. Пиктон, А.Г. Смит, Р. Уолтерс. – М.: Мир, 1985. – 140 с.
31. Tissot V.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.
32. Depositional environments, organic richness, and petroleum generating potential of the Campanian to Maastrichtian Enugu for-

- mation, 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.
33. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование нефтидогенеза Южного Ямала // *Геофизический журнал*. – 2011. – Т. 33. – № 2. – С. 80–104.
34. Историко-геологическое моделирование процессов нефтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского

моря (бассейновое моделирование) / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, Н.А. Малышев, 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.

Поступила 17.07.2014 г.

UDC 553.98:551.763:550.836

PETROLEUM POTENTIAL OF THE LOWER CRETACEOUS RESERVOIRS OF NYUROL'KA MEGADEPRESSION

Elizaveta N. Osipova,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: osipovaen@list.ru

Galina A. Lobova,

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

Valeriy I. Isaev,

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

Vitaly I. Starostenko,

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

The relevance of the research is caused by the need of reproduction and expansion of oilfields area resource base in Tomsk region. This direction in development of oil and gas complex, increase of raw material potential is resources-saving, minimizing the volume of investment for exploration, mastering and subsequent extraction.

The main aim of the research is to identify and to propose the priority areas for exploration and development of oil and gas complex of the Lower Cretaceous in the territory Nyurol'ka megadepression and structures of its framing.

Objects of researches are the slope (clinoform) parts of Neocomian cyclites – achimovka reservoir, and undaform (shallow-shelf) parts of Neocomian cyclites, shelf reservoir. Neocomian deposits are poorly studied and characterized by a complex type of traps and difficult identification of productive layers.

Methods of researches: reservoirs geomapping; computer paleotectonic reconstructions and paleotemperature modeling of sedimentary cover, including oil source sediments; selection by geotemperature criterion and mapping the centers of Bazhenov oil intense generation; evaluation of generated oil density distribution; evaluation and analysis of oil resource relative density distribution in Neocomian achimovka and shelf reservoirs; zoning of reservoirs according to the prospectivity degree.

Research results. The authors have given the volumetric-areal characterization for Neocomian Achimov and shelf reservoirs, plotted the maps of the total thickness of seven cyclites of Achimovka and five cyclites in shelf sediments; reconstructed the thermal history of bazhenov sediments in sections of thirty-nine deep wells; selected and mapped paleosources of Bazhenov oil generation on 18 key moments of geologic time; plotted the map of distribution of generated oil resource density and the maps of distribution of relative density of the accumulated resources; carried out zoning for Achimovka and shelf reservoirs; proposed the areas of priority for searching for Achimov reservoir – the area of south-eastern slope of Kaymysov arch, junction zone of Chuzik-Chizhap and Shingin mezosaddles, thirty kilometer are of sub-East-West extension in the central part of Nyurol'ka megadepression, and for shelf reservoirs – area of East-West extension, which covers the eastern half of Kulan-Igay depression and the western part of the Festival shaft (3500 km²) and the junction zone of the northern side of Nyurol'ka megadepression with the eastern slope of Kaymysov dome and south-western slope of Srednevasyugan megaswell (500 km²).

Key words:

Shelf deposits and Achimovka reservoirs of the Neocomian deposits, thermal history of the Bazhenov sediments, density of the resources of generated oils, Nyurol'ka megadepression.

The authors appreciate B.V. Belozero for detailed paper study and commentaries contributing to better comprehension and reasoning of conclusions.

REFERENCES

- Kontorovich V.A., Lapkovskiy V.V., Lunev B.V. Model formirovaniya neokomskogo klinoformnogo kompleksa Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii s ucheto izostazii [The model of forming the wedge-like Neocomian complex of the Western Siberian oil and gas province in view of isostasy]. *Geologiya nefiti i gaza – Geology of oil and gas*, 2014, no. 1, pp. 65–72.
- Zakhryamina M.O. Printsipialnaya model stroeniya achimovskoy tolshchi Surgutskogo i Nizhneartovskogo svodov i ee vzaimootnoshenie s shelfovymi plastami neokoma [The principled model of Achimovsky layer of the Surgut and Nizhneartovsk arches and its relationship with shelf deposits of the Neocomian]. *Geologiya nefiti i gaza – Geology of oil and gas*, 2014, no. 1, pp. 58–63.
- Kurchikov A.R., Borodkin V.N. Stratigrafiya i paleogeografiya berrias-nizhneaptskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri v svyazi s klinoformnym stroeniem razreza [Stratigraphy and paleogeography of Berriasian-Lower Aptian deposits of the Western Siberia in connection with the wedge-like structure of cross-section]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 1093–1106.
- Melnik I.A., Erofeev L.Ya. Fiziko-geokhimicheskaya model nizkoomnogo kolektora i ee prakticheskoe primeneniye [The physical and geochemical model of low resistivity reservoir and its practical application]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy – Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2014, no. 3, pp. 46–50.
- Zhiltsova A.A., Isaev V.I., Korzhov Yu.V. Vertikalnaya geokhimicheskaya zonalnost neftegazonosnykh kompleksov (na primere Rogozhnikovskogo i Severo-Rogozhnikovskogo mestorozhdeniy) [Vertical geochemical zonality of oil-and-gas complexes (by the example of Rogozhnikovsky and North Rogozhnikovsky fields)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 69–82.
- Korzhov Yu.V., Isaev V.I., Zhiltsova A.A., Latipova O.V. Raspredelenie aromatischeskikh uglevodorodov v razreze otlozheniy neftegazonosnykh kompleksov (na primere mestorozhdeniy Krasnoleninskogo svoda) [Distribution of aromatic hydrocarbons in a section of deposits of oil-and-gas complexes (by the example of the fields of the Krasnoleninsky arch)]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2013, vol. 35, no. 1, pp. 113–129.
- Bogorodskaya L.I., Kontorovich A.E., Larichev A.I. Kerogen: metody izucheniya, geokhimicheskaya interpretatsiya [Kerogen: methods of study, geochemical interpretation]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2005. 254 p.
- 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.
- 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 (by the example of Bazhenov Formation)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
- Popov S.A., Isaev V.I. Modelirovaniye protsessov generatsii i emigratsii uglevodorodov [Modeling of hydrocarbons generation and emigration]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 316, no. 1, pp. 104–110.
- Batalin O.Yu., Vafina N.G. Temperatura i glubina obrazovaniya nefiti [Temperature and depth of oil formation]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy – Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2012, no. 11, pp. 53–61.
- Osipova E.N., Lobova G.A. Geotemperaturny rezhim bazhenovskoy svity i nefteperspektivnye zony melovykh otlozheniy (Nyurolskaya megavpadina) [Geothermal regime of the Bazhenov Formation and petroleum perspective zone of the Cretaceous sediments (Nyurolsky megadepression)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 51–56.
- Kostyreva E.A. *Geokhimiya i genezis paleozoyskikh neftey yugovostoka Zapadnoy Sibiri* [Geochemistry and genesis of Paleozoic oil in southeast of the Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2005. 183 p.
- Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoykskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil-and-gas bearing of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern of the Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p.
- Danenberg E.E., Belozero V.B., Brylina N.A. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost verkhneyursko-nizhnelovoykh otlozheniy yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity (Tomskaya oblast)* [Geological structure and petroleum potential of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous sediments of the southeast of the Western Siberian Plate (Tomsk region)]. Tomsk, TPU Publ., 2006. 291 p.
- Brylina N.A., Kamynina L.I., Moskalenko V.A., Shatilova T.N. Nizhnelovoye otlozheniya Tomskoy oblasti (geologicheskoe rayonirovaniye) [The Lower Cretaceous deposits of the Tomsk region (geological zoning)]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Proc. of the Regional Conference of Geologists of Siberia, the Far East and North-East of Russia]. Tomsk, GalaPress Publ., 2000. Vol. 1, pp. 231–233.
- 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.
- Ermakov V.I., Skorobogatov V.A. *Teplovoe pole i neftegazonosnost molodykh plit SSSR* [Thermal field and oil-and-gas the young plates of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 222 p.
- Isaev V.I., Fomin A.N. Foci of oil generation of the Bazhenov- and Togur-type oils in the southern of the Nyurol'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
- Connan J. Time-temperature relation in oil genesis. *AAPG Bull.*, 1974, vol. 58, pp. 2516–2521.
- Hunt J. *Geokhimiya i geologiya nefiti i gaza* [Geochemistry and geology of oil and gas]. Moscow, Peace Publ., 1982. 704 p.
- Isaev V.I., Gulenok R.Yu., Veselov O.V., Bychkov A.V., Soloveyichik Yu.G. Kompyuternaya tekhnologiya kompleksnoy otsenki neftegazovogo potentsiala osadochnykh basseynov [Computer technology of the integrated assessment of oil and gas potential of sedimentary basins]. *Geologiya nefiti i gaza – Geology of oil and gas*, 2002, no. 6, pp. 48–54.
- Kurchikov A.R., Stavicky B.P. *Geotermiya neftegazonosnykh oblastey Zapadnoy Sibiri* [Geothermics oil and gas fields of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 134 p.
- Sharbatian F.F. *Ekstremalnye otsenki v geotermii i geokriologii* [Extreme estimates in the geothermic and cryopedology]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 123 p.
- Isaev V.I. Paleotemperature modelling of the sedimentary section, and oil-and-gas generation. *Geology of the Pacific Ocean*, 2004, vol. 23, no. 5, pp. 101–115.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Royak M.E., Fomin A.N. Neftegazonosnost tsentralnoy chasti Yugorskogo svoda [Oil-and-gas content of the central part of the Ugra arch]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2009, vol. 31, no. 2, pp. 15–46.
- Lobova G.A., Osipova E.N., Krinitsina K.A., Ostankova Yu.G. Vliyaniye paleoklimata na geotermicheskiy rezhim i neftegeneratsionny potentsial bazhenovskoy svity (na shirootakh Tomskoy oblasti) [Influence of paleoclimate on geothermal regime and oil generation potential of the Bazhenov Formation (at latitudes Tomsk region)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 45–50.

28. Isaev V.I., Iskorkina A.A. Mezozoysko-kaynozoyusky hod temperatur na poverkhnosti Zemli i geotermichesky rezhim yurskikh neftematerinskikh otlozheny (yuzhnaya paleoklimaticheskaya zona Zapadnoy Sibiri) [The Mesozoic and Cenozoic course of temperatures on surfaces of Earth and the geothermal mode of the Jurassic petromaternal deposits (the southern paleoclimatic zone of Western Siberia)]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2014, vol. 36, no. 5, pp. 64–80.
29. Starostenko V.I. *Ustoychivye chislennyye metody v zadachakh gravimetrii* [Stable numerical methods in problems of gravimetry]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1978. 228 p.
30. Harland U.B., Koks A.V., Llevellin P.G., Pikton K.A.G., Smit A.G., Uolters R. *Shkala geologicheskogo vremeni* [Scale of geological time]. Moscow, Peace Publ., 1985. 140 p.
31. 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.
32. 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.
33. Popov S.A., Isaev V.I. Modelirovanie naftidogeneza Yuzhnogo Yamala [Modeling of naftidogenesis of Southern Yamal]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 80–104.
34. Kontorovich A.E., Burshteyn L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Guskov S.A., Ershov S.V., Kazanenkov 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 modelirovanie protsessov naftidogeneza v mezozoysko-kaynozoyuskom osadochnom bassejne Karskogo morya (basseynovoe modelirovanie) [Historical and geological modeling of naftidogenesis in Mesozoic-Cenozoic sedimentary basin of the Kara Sea (basin modeling)]. *Geologiya i Geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.

Received: 17 July 2014.

КАРБОНАТЫ КАЛЬЦИЯ В ХОЛЕЛИТАХ

Машина Екатерина Валерьевна,

мл. науч. сотр. лаборатории экспериментальной минералогии ИГ Коми НЦ УрО РАН, Россия, 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54. E-mail: borovkova@geo.komisc.ru

Макеев Борис Александрович,

канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. лаборатории структурной и морфологической кристаллографии ИГ Коми НЦ УрО РАН, Россия, 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54. E-mail: mak@geo.komisc.ru

Филиппов Василий Николаевич,

ст. науч. сотр. лаборатории экспериментальной минералогии ИГ Коми НЦ УрО РАН, Россия, 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54. E-mail: borovkova@geo.komisc.ru

Актуальность работы. Карбонат кальция в виде трех его полиморфных модификаций: кальцита, арагонита и ватерита, помимо природных систем, встречается в составе патогенных биоминеральных агрегатов, таких как холелиты. Решение вопроса генезиса карбоната кальция в холелитах имеет не только медицинское практическое значение, но и представляет большой интерес с точки зрения минералогического изучения. Исследования морфологических особенностей, возможного изоморфизма, условий образования карбоната кальция в холелитах позволят сравнить его с аналогами минералов, встречающихся в природных объектах, и тем самым наметить общую картину биоминералогенезиса.

Цель работы: изучить распространенность, особенности химического состава и морфологии карбоната кальция в холелитах жителей Республики Коми.

Методы исследования: рентгеноструктурный анализ (Shimadzu XRD-6000), электронный микроскоп JSM 6400, оснащенный энергодисперсионным спектрометром «Link».

Результаты. Изучение 50 образцов холелитов рентгеноструктурным анализом показало, что в 39 из них фиксировался карбонат кальция различной модификации. При этом ватерит обнаружен в 74 % проанализированных карбонатсодержащих холелитов, в 38 % он присутствовал в качестве единственной полиморфной модификации. Одновременно три полиморфные модификации карбоната кальция были зафиксированы только в 10 % случаях. Исследование морфологических особенностей карбоната кальция методом РЭМ показало, что карбонаты визуализировались в виде пластинчатых кристаллов, зерен ромбодрической, конусовидной, шаровидной, радиально-лучистой, гантелеобразной и неправильной формы. В составе рассматриваемых карбонатов фиксируются элементы-примеси: магний, марганец, железо и кремний, содержание которых не превышает 2 мас. %.

Выводы. Установлено, что ватерит является самой распространенной полиморфной модификацией карбоната кальция в исследуемых холелитах.

Ключевые слова:

Холелиты, карбонат кальция, морфология, полиморфные модификации, примеси, генезис.

Введение

Карбонаты кальция биогенного происхождения, как в природных условиях, так и в организме человека, присутствуют в виде трех полиморфных модификаций: кальцита, арагонита и ватерита. В отличие от кальцита и арагонита, ватерит мало распространен в природных минеральных системах. Однако в организме человека в составе патогенных конкрементов, таких как холелиты, обычно встречается ватерит [1, 2]. Спорадически попадают желчные камни, содержащие одновременно три модификации карбоната кальция и еще реже чисто карбонатные камни. Карбонатные камни чаще обнаруживают у детей, чем у взрослых [3]. Процессы осаждения карбоната кальция в биологических средах, в том числе и в желчной системе, весьма сложны, в них постоянно происходят изменения условий, что представляет собой неравновесную систему. Решение вопроса генезиса карбо-

ната кальция в патогенных конкрементах имеет не только медицинское практическое значение, но и представляет большой интерес с точки зрения минералогического изучения. Исследования морфологических особенностей, возможного изоморфизма, условий образования карбоната кальция в холелитах позволят сравнить его с аналогами минералов, встречающихся в природных объектах, и тем самым наметить общую картину биоминералогенезиса. Кроме того, выяснение устойчивости ватерита в холелитах, возможно, даст ключ к факторам его неустойчивости в геологической среде.

Методы и подходы

В работе приводятся результаты исследований о частоте встречаемости карбоната кальция в холелитах жителей Республики Коми. Рассмотрены особенности химического состава и морфологии карбоната кальция. В качестве методов использо-

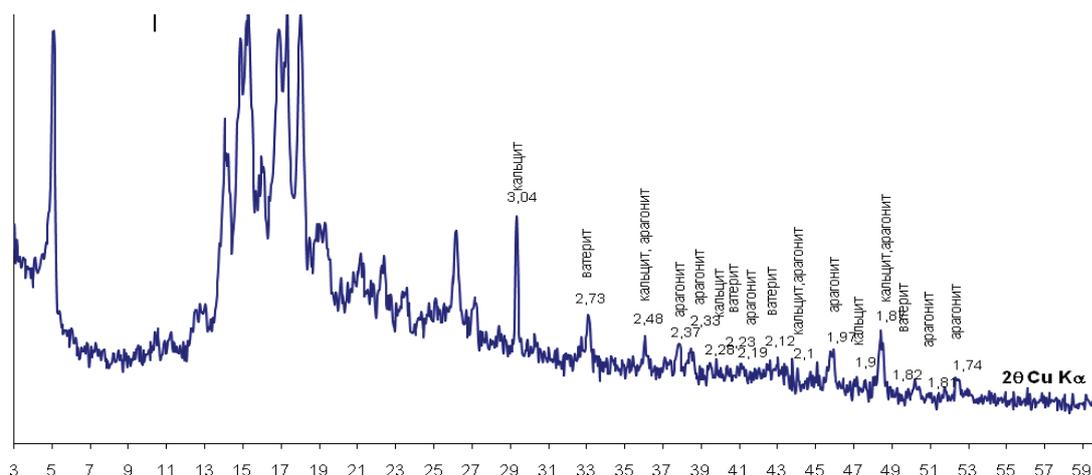


Рис. 1. Рентгенограмма холестеринового камня, содержащего три полиморфные модификации карбоната кальция: кальцит, арагонит и ватерит

Fig. 1. X-ray diagram of cholesterol stone containing three polymorphic modifications of calcium carbonate: calcite, aragonite and vaterite

вались рентгеноструктурный анализ (Shimadzu XRD-6000) и электронный микроскоп JSM 6400, оснащенный энергодисперсионным спектрометром «Link».

Результаты и обсуждение

На полученных рентгеновских дифрактограммах в 39 образцах из 50 фиксировался карбонат кальция различной модификации. При этом ватерит, арагонит, кальцит обнаружены в 74, 33, 33 % случаях соответственно, где в 38 % камней ватерит присутствовал в качестве единственной полиморфной модификации. Одновременно три полиморфные модификации карбоната кальция были зафиксированы только в 10 % случаях (рис. 1).

Рассчитаны параметры элементарной ячейки арагонита, кальцита и ватерита, которые приведены в таблице. Для ватерита значение параметра *a* меньше эталонного значения [4], это прослеживается также у Ф.В. Зузук [5] и Ю.А. Ефимова и др. [6]. Уменьшение параметра *a* может объясняться вхождением различных примесей в позицию кальция. Считается, что вхождение элементов-примесей неорганических ионов в структуру биогенных карбонатов носит сложный характер, зависящий от «биогенного фракционирования» [7]. Такие процессы в одних случаях могут стимулировать

вхождение примесей в карбонаты кальция, в других – тормозить их вхождение.

Исследование морфологических особенностей карбоната кальция было проведено в 5 образцах (1 пигментный и 4 холестериновых желчных конкремента). В холестериновых холелитах карбонаты кальция встречались в виде пластинчатых кристаллов, зерен ромбоэдрической (6 мкм), конусовидной (5 мкм), шаровидной (от 1 до 12 мкм), радиально-лучистой (15 мкм), гантелеобразной (30 мкм) и неправильной формы (рис. 2, а–ж).

В периферийной области одного из камней прослеживалась карбонатная зона, из которой наблюдался рост пластинчатого кристалла карбоната кальция размером 20 мкм (рис. 3, а, б). При этом на РЭМ снимках отчетливо прослеживалось, что данная зона по морфологии отличается от переслаивающегося с ней кристаллического холестерина и имеет гранулированный вид. В пигментном камне карбонаты кальция наблюдались в виде пластинчатых кристаллов порядка 3 мкм и зерен неправильной формы около 12 мкм. Также в образце выявлены карбонаты кальция и магния (биодоломит) размером 30 мкм, имеющие ромбоэдрический облик (рис. 2, з). В холестериновых камнях в составе карбоната кальция обнаружены элементы-примеси (мас. %): магний (0,72–1,54), марганец (0,33–2,08) и железо (2,22), в

Таблица. Параметры элементарной ячейки карбоната кальция в холелитах

Table. Parameters of calcium carbonate space unit in gallstones

Объект Object	Параметры элементарной ячейки, Å Parameters of a space unit, Å						Автор Author	
	кальцит/calcite		арAGONIT/argONITE			ватерит/vaterite		
	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>		<i>c</i>
Холелиты Gallstones	4,963–4,990	17,03–17,09	4,95	7,96	5,73	7,116–7,148	16,867–16,961	[5]
	4,989	17,061	4,962	7,96	5,74	7,147	16,917	[6]
	5,00	17,04	4,966	7,96	5,73	7,130–7,149	16,84–16,98	Наши данные
Стандартное значение Standard value	4,991	17,06	4,95	7,96	5,74	7,151	16,935	[4]

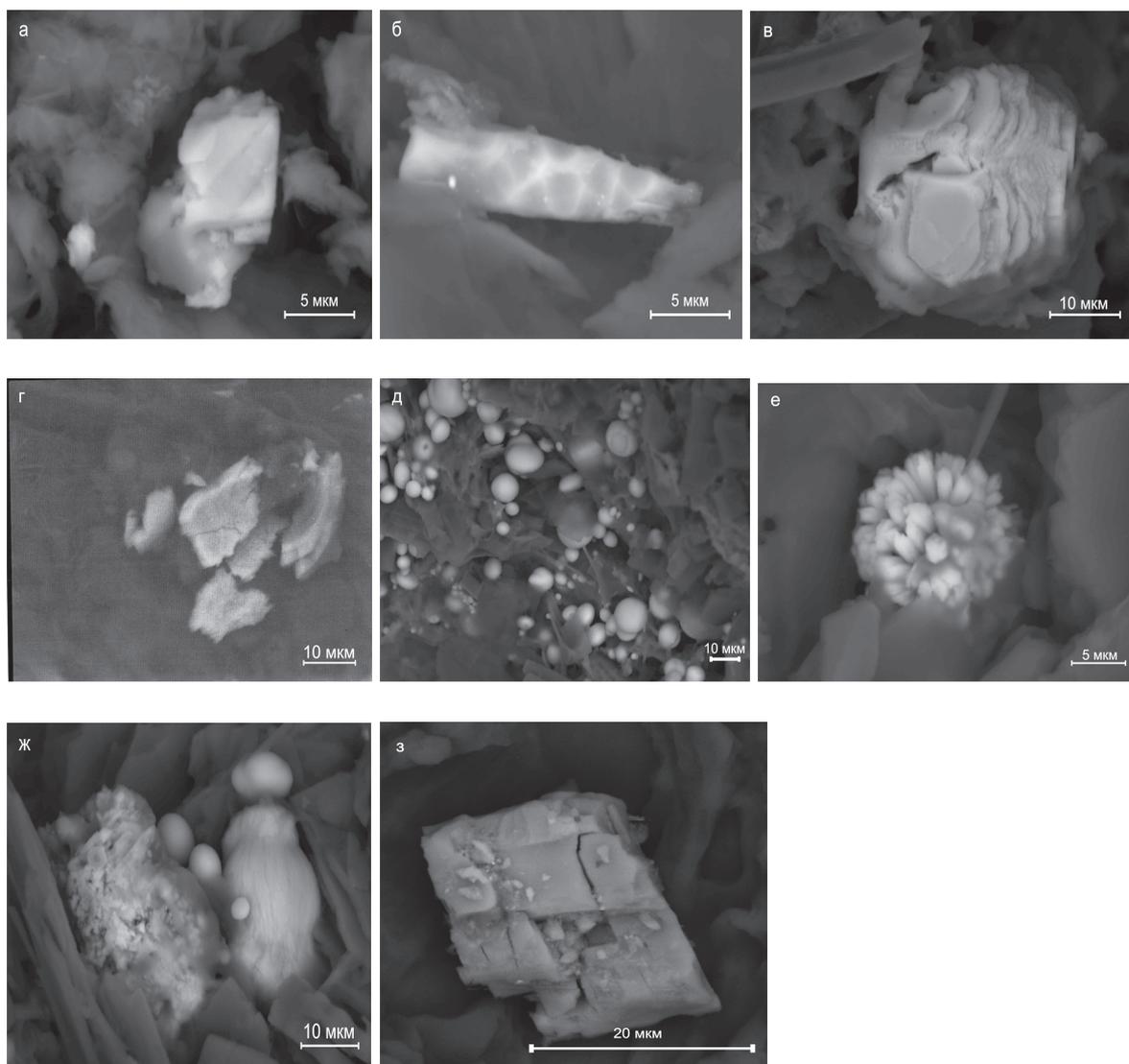


Рис. 2. Карбонаты кальция различной морфологии: ромбоэдрическая (а, з); конусовидная (б); пластинчатая (в, г); шарообразная (д); радиально-лучистая (е); гантелеобразная, неправильной формы (ж). РЭМ изображения – в упруго-отраженных электронах

Fig. 2. Calcium carbonates with different morphology: rhombohedral (a, z); cone-shaped (б); lamellar (в, г); spheric (д); radial fibrous (е); dumbbell, irregular (ж). SEM-images are in elastic backscattered electrons

пигментом холелите – кремний (0,53–1,89). В составе рассматриваемых карбонатов также фиксируются сера, фосфор, иногда хлор. Присутствие серы, вероятно, связано с белками и мукополисахаридами, а фосфора – с фосфолипидами. Сообщается, что кристаллические индивиды в желчных камнях отделены друг от друга прослойками органического вещества, в состав которого входит холевая кислота, белковые вещества и фосфолипиды [8].

На генезис карбоната кальция в желчных камнях существуют различные точки зрения. Так, по мнению [9], количество солей кальция в виде бикарбонатов всегда увеличивается при всех застойных и воспалительных явлениях в желчных протоках и желчном пузыре. Указывается, что повышенный уровень CO_2 в общем желчном протоке

также может способствовать образованию карбоната кальция в желчных камнях [10]. В детском возрасте появление карбонатных камней связывают с обструкцией пузырного протока, что способствует стимулированию секреции муцина (гликопротеин) с последующим осаждением карбоната кальция [3]. Известно, что в норме муцин постоянно секретруется слизистой желчного пузыря, однако отмечена его повышенная концентрация в литогенной желчи [11]. Сам муцин упакован в литогенные гранулы, содержащие высокие концентрации кальция. Механизм упаковки муцина в гранулах пока неизвестен [12]. Китайские исследователи предполагают, что инфекция *Clonorchis sinensis* способствует формированию карбоната кальция в холелитах [13]. Между тем считается,

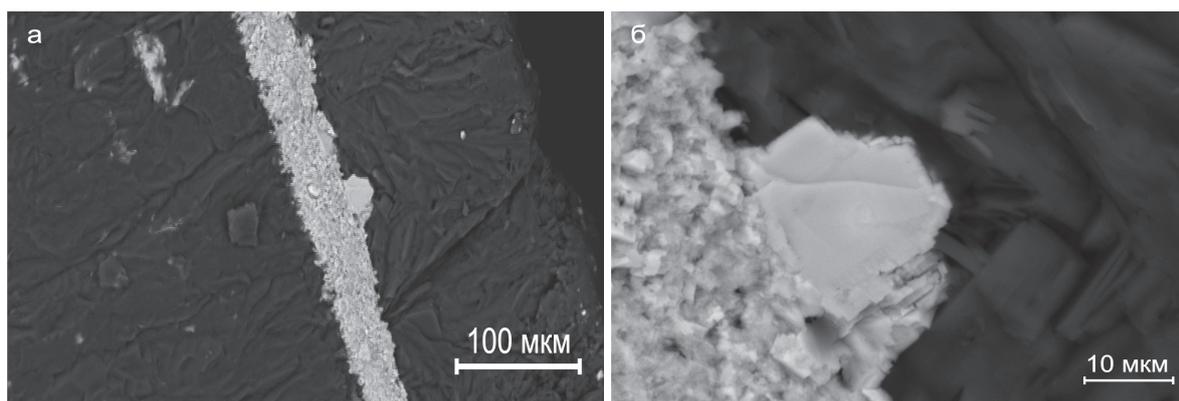


Рис. 3. РЭМ изображение фрагмента периферийной части холелита; светлая полоса на снимке – карбонатная зона (увеличенное изображение) (а), на котором виден пластинчатый кристалл карбоната кальция (б)

Fig. 3. SEM-images of a fragment of a gallstone periphery part; a light stripe is a magnified image of a carbonate zone (a) with a lamellar crystal of calcium carbonate (b)

что микроорганизмы вызывают не только повышение секреции муцина, но и могут быть центрами зарождения желчных конкрементов [14].

Результаты наших исследований подтверждают данные [1, 2], что ватерит является преобладающей модификацией карбоната в желчных камнях. Чем может быть обусловлена такая устойчивость ватерита в холелитах, пока точно не установлено. Экспериментально показано, что кристаллический холестерин представляет собой нерастворимую подложку, которая обуславливает гетерогенное зарождение ватерита [15]. Изучение различных зон двух образцов холелитов показало, что повышенное содержание железа фиксируется в составе ватерита [1]. Согласно [16], аминокислоты, являющиеся главными составляющими протеинов желчи, стабилизируют ватерит. Проведенные опыты показали, что присутствие в системе L-Cys формирует пластинчатый кальцит, а L-Тур, DL-Асп и L-Лус – ватерит сферической формы. Здесь следует отметить, что ватерит сферической формы может образовываться в результате бактериальной деятельности [17]. В модельных системах по кристаллизации карбонатов [18] присутствие аспарагиновой кислоты и холестерина стимулирует осаждение ватерита. Авторы [19], изучившие желчные конкременты, пришли к выводу, что центры кам-

ней представлены комплексом фибриллярных белков с желчными пигментами, фосфатами и карбонатами кальция. Помимо этого, в холестериновых холелитах обнаружили белки с различной молекулярной массой, причем белки с низкой молекулярной массой (менее 10 кДа) ингибировали осаждение карбоната кальция в пробирке [20]. Так или иначе, причины избирательной кристаллизации той или иной полиморфной модификации карбоната кальция в процессе патогенной минерализации носит сложный характер и во многом определяется спецификой среды образования.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований удалось установить, что карбонаты в исследуемых холелитах представлены кальцитом, арагонитом и ватеритом, из которых ватерит является самой распространенной полиморфной модификацией. В качестве примеси в карбонатах кальция присутствуют магний, марганец, железо и кремний. Морфология карбонатов кальция многообразна, от хорошо окристаллизованных ромбоэдрических зерен до весьма причудливых.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований РАН (проект № 12-П-5-1011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Palchik N.A., Moroz T.N. Polymorph modification of calcium carbonate in gallstone // *Crystal Growth*. – 2005. – V. 283. – № 3–4. – P. 450–456.
2. Sutor D.J. The composition of gallstones // *Hepatology*. – 1979. – V. 4. – P. 19–29.
3. Calcium carbonate gallstones in children / M.D. Stringer, R.D. Soloway, D.R. Taylor, K. Riyad, G. Toogood // *Pediatric Surgery*. – 2007. – V. 42. – № 10. – P. 1677–1682.
4. Кристаллографическая и кристаллохимическая база данных для минералов и их структурных аналогов. URL: <http://database.iem.ac.ru/mincryst> (дата обращения: 10.09.2014).
5. Зузук Ф.В. Мінералогія уролітів. Мінеральний та хімічний склад уролітів. – Луцьк: РВВ «Вежа» Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки, 2003. – Т. 2. – 508 с.
6. Рентгенография желчных камней / Ю.А. Ефимова, Г.М. Кузьмичева, Е.А. Никитина, С.В. Орлова // *Вопросы биологической медицинской и фармацевтической химии*. – 2005. – № 2. – С. 36–49.
7. Фейцгер Я. Элементы-примеси и изотопы в осадочных карбонатах // *Карбонаты: Минералогия и химия*. – М.: Мир, 1987. – С. 329–370.
8. Кораго А.А. Введение в биоминералогию. – СПб: Недра, 1992. – 279 с.

9. Хирургия печени и желчевыводящих путей / А.А. Шалимов, С.А. Шалимов, М.Е. Ничитайло, Б.В. Доманский. – Киев: Здоровье, 1993. – 512 с.
10. Sutor D.J., Wilkie L.I. Calcium carbonate in human gallstones total CO₂ in bile // *Gut*. – 1978. – V. 19. – P. 220–224.
11. Желчнокаменная болезнь / С.А. Дадвани., П.С. Ветшев, А.М. Шулушко, М.И. Прудков. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 176 с.
12. Железная Л.А. Муцины – новый подкласс гликопротеинов // *Успехи биологической химии*. – 1997. – Т. 37. – С. 115–147.
13. Clonorchis sinensis eggs are associated with calcium carbonate gallbladder stones / Tie Qiao, Rui-hong Ma, Zhen-liang Luo, Liu-qing Yang, Xiao-bing Luoc, Pei-ming Zheng // *Acta Tropica*. – 2014. – V. 138. – P. 28–37.
14. Галеев М.А., Тимербулатов В.М. Желчнокаменная болезнь и холецистит. – Уфа: БГМУ, 1997. – 219 с.
15. Kanakis J., Dalas E. The crystallization of vaterite on fibrin // *Crystal Growth*. – 2000. – V. 219. – P. 277–282.
16. Crystal growth of calcium carbonate with various morphologies in different amino acid systems / A.J. Xie, Y.H. Shen, C.Y. Zhang, Z.W. Yuan, X.M. Zhu, Y.M. Yang // *Crystal Growth*. – 2005. – V. 285. – № 3. – P. 436–443.
17. Biom mineralization induced by Myxobacteria / C. Jimenez-Lopez, F. Jroundi, M. Rodriguez-Gallego, J.M. Arias, M.T. Gonzalez-Muñoz // *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*. – 2007. – V. 1. – P. 143–154.
18. Франке В.Д., Бочаров С.Н., Трушина Ю.М. Влияние желатина и аспарагиновой кислоты на морфологию кристаллов карбоната кальция // *Минералогическая интервенция в микро- и наномир. Международный минералогический семинар*. – Сыктывкар, 2009. – С. 504–505.
19. Been J.M., Bills P.M., Lewis D. Microstructure of gallstones // *Gastroenterology*. – 1979. – V. 76. – № 3. – P. 548–556.
20. Isolation of an acidic protein from cholesterol gallstones, which inhibits the precipitation of calcium carbonate in vitro / S. Shimizu, B. Sabsay, A. Veis, J. Ostrow, R. Rege, L. Dawes // *Clinical Investigation* – 1989. – V. 84. – P. 1990–1996.

Поступила 17.09.2014 г.

UDC 549 + 548.5:612.357.64

CALCIUM CARBONATES IN GALLSTONES

Ekaterina V. Mashina,

IG Komi Science Centre, 54, Pervomaychkaya street, Syktyvkar, Republic of Komi, 167982, Russia. E-mail: borovkova@geo.komisc.ru

Boris A. Makeev,

Cand. Sc., IG Komi Science Centre, 54, Pervomaychkaya street, Syktyvkar, Republic of Komi, 167982, Russia. E-mail: mak@geo.komisc.ru

Vasily N. Filippov,

IG Komi Science Centre, 54, Pervomaychkaya street, Syktyvkar, Republic of Komi, 167982, Russia. E-mail: borovkova@geo.komisc.ru

Relevance of the research. Calcium carbonate, in the form of its three polymorphs: calcite, aragonite and vaterite, is included, beside natural systems, in composition of pathogenic biomineral aggregates, such as gallstones. The solution of the problem with calcium carbonate genesis in gallstones is not only of medical practical value, but it also of a great interest from the point of view of mineralogical study. The study of morphological features, possible isomorphism, formation conditions of calcium carbonate in gallstones will allow comparing it with mineral analogues in natural objects, and thus, outlining the pattern of biomineral genesis.

The aim of research is to study the distribution, the features of chemical composition and morphology of calcium carbonate in the gallstones of inhabitants of Komi Republic.

Methods of research: X-Ray structural analysis (Shimadzu XRD-6000), electron microscope JSM 6400 with energy-dispersive spectrometer «Link».

Results. The study of 50 gallstones samples by X-ray structural analysis showed that 39 samples contained calcium carbonate of various modifications. Vaterite was detected in 74 % of the analyzed carbonate-containing gallstones and in 38 % of samples vaterite was as the only polymorph. Simultaneously three polymorphs of calcium carbonate were determined only in 10 %. The REM study of morphological features of calcium carbonate showed that the carbonates were visualized as lamellar crystals, rhombohedral, conical, dumbbell and irregular grains. The carbonates under study contain the admixtures: magnesium, manganese, iron and silicon, which content is less 2 wt. %.

Conclusions. It was determined that vaterite is the dominant polymorph carbonate calcium in the studied gallstones.

Key words:

Gallstones, calcium carbonate, morphology, polymorphic modifications, admixtures, genesis.

The research was financially supported by the program of fundamental researches of the Russian Academy of Sciences (project no. 12-II-5–1011).

REFERENCE

1. Palchik N.A., Moroz T.N. Polymorph modification of calcium carbonate in gallstone. *Crystal Growth*, 2005, vol. 283. no. 3–4, pp. 450–456.
2. Sutor D.J. The composition of gallstones. *Hepatology*, 1979, vol. 4, pp. 19–29.
3. Stringer M.D., Soloway R.D., Taylor D.R., Riyad K., Toogood G. Calcium carbonate gallstones in children. *Pediatric Surgery*, 2007, vol. 42. no. 10, pp. 1677–1682.
4. *Kristallograficheskaya i kristallokhimicheskaya baza dannykh dlya mineralov i ikh strukturnykh analogov* [Crystallographic and crystal Database for minerals and their structural analogues]. Available at: <http://database.iem.ac.ru/mincryst> (accessed 10 September 2014).
5. Zuzuk F.V. *Mineralogiya urolitiv. Mineralny ta khimichny sklad urolitii* [Mineralogy of urinary stones. Mineral and chemical composition of urinary stones]. Lutsk, RVV «Vezha» Volin. derzh. un-tu im. Lesi Ukrainki Publ., 2003. No. 2, 508 p.
6. Efimova Yu.A., Kuzmicheva G.M., Nikitina E.A., Orlova S.V. Rentgenografiya zhelchnykh kamney [Radiography of gallstones]. *Voprosy biologicheskoy meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii*, 2005, no. 2, pp. 36–49.
7. Feytser Ya. Elementy-primesi i izotopy v osadochnykh karbonatakh [Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates]. *Karbonaty: mineralogiya i khimiya* [Carbonates: mineralogy and chemistry]. Moscow, Mir publ., 1987. pp. 329–370.
8. Korago A.A. *Vvedenie v biomineralogiyu* [Introduction to biomineralogy]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1992. 279 p.
9. Shalimov A.A., Shalimov S.A., Nichitaylo M.E., Domansky B.V. *Khirurgiya pecheni i zhelchevyvodyashchikh putey* [Surgery of the liver and biliary tract]. Kiev, Zdorovye Publ., 1993. 512 p.
10. Sutor D.J., Wilkie L.I. Calcium carbonate in human gallstones total CO₂ in bile. *Gut*, 1978, vol. 19, pp. 220–224.
11. Dadvani S.A., Vetshev P.S., Shulutko A.M., Prudkov M.I. *Zhelchnokamennaya bolezn* [Cholelithiasis]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2009. 176 p.
12. Zheleznaya L.A. Mutsiny – novy podklass glikoproteinov [Mucins is a new subclass of glycoproteins]. *Uspekhi biologicheskoy khimii*, 1997, no. 37, pp. 115–147.
13. Tie Qiao, Rui-hong Ma, Zhen-liang Luo, Liu-qing Yang, Xiao-bing Luoc, Pei-ming Zheng. Clonorcis sinensis eggs are associated with calcium carbonate gallbladder stones. *Acta Tropica*, 2014, vol. 138, pp. 28–37.
14. Galeev M.A., Timerbulatov V.M. *Zhelchnokamennaya bolezn i kholetsistit* [Cholelithiasis and cholecystitis]. Ufa, BGMU Publ., 1997. 219 p.
15. Kanakis J., Dalas E. The crystallization of vaterite on fibrin. *Crystal Growth*, 2000, vol. 219, pp. 277–282.
16. Xie A. J., Shen Y.H., Zhang C.Y., Yuan Z.W., Zhu X.M., Yang Y.M. Crystal growth of calcium carbonate with various morphologies in different amino acid systems. *Crystal Growth*, 2005, vol. 285, no. 3, pp. 436–443.
17. Jimenez-Lopez C., Jroundi F., Rodríguez-Gallego M., Arias J.M., Gonzalez-Muñoz M.T. Biomineralization induced by Myxobacteria. *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*, 2007, vol. 1, pp. 143–154.
18. Franke V.D., Bocharov S.N., Trushina Yu.M. Vliyanie zhelatina i asparaginovoy kisloty na morfologiyu kristallov karbonata kalt-siya [Effect of gelatin and aspartic acid on morphology of the calcium carbonate crystals]. *Mezhdunarodny mineralogicheskyy seminar «Mineralogicheskaya interventsiya v mikro- i nanomir»* [International Mineralogical Seminar. Mineralogical intervention in micro- and nanoworld]. Syktyvkar, 2009. pp. 504–505.
19. Been J.M., Bills P.M., Lewis D. Microstructure of gallstones. *Gastroenterology*, 1979, vol. 76, no. 3, pp. 548–556.
20. Shimizu S., Sabsay B., Veis A., Ostrow J., Rege R., Dawes L. Isolation of an acidic protein from cholesterol gallstones, which inhibits the precipitation of calcium carbonate in vitro. *Clinical Investigation*, 1989, vol. 84, pp. 1990–1996.

Received: 17 September 2014.

УДК 552.321.6:553.08

ТАЛАЖИНСКИЙ И АРГЫСУКСКИЙ МАССИВЫ: ОБЩНОСТЬ ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ЧЕРТ (СЕВЕРО-ЗАПАД ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Юричев Алексей Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. петрографии
геолого-географического факультета ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский государственный университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com.

Чернышов Алексей Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии
геолого-географического факультета ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский государственный университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: aich@ggf.tsu.ru.

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального петрологического исследования многочисленных потенциально рудоносных мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна с целью совершенствования региональных схем корреляции, а также выявления в них Pt-Cu-Ni оруденения.

Цель работы: доказательство существенного сходства Талажинского и Аргысукского массивов и возможности их отнесения к единому формационному типу.

Методы исследования: петрографическая характеристика на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss, петрохимический состав пород методом РФА, редкие и редкоземельные элементы методом ICP-MS, химический состав минералов на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II XMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA x-sight) INCA Energy 450 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.

Результаты. Исследованы петролого-геохимические особенности Талажинского и Аргысукского массивов Канской глыбы Восточного Саяна. Выявлено их высокое сходство. Авторы допускают, что дополнительные детальные исследования этих объектов позволят при совершенствовании региональных схем корреляции объединить их в единый формационный комплекс. Предположено, что оба массива являются единым интрузивным телом, которое сформировалось в условиях островной дуги из исходного высокоглиноземистого оливин-базальтового расплава, зарождение очагов которого происходило за счет толеитовых базальтов океанического плато при их плавлении в зоне субдукции. Последующая эволюция расплава обусловлена процессами его перемещения в земной коре, которые сопровождались контаминацией вмещающих пород. Расслоенность интрузии, очевидно, обусловлена процессами магматической и кристаллизационной дифференциации в магматической камере. Оба массива отнесены к перспективным объектам на выявление медно-никелевого оруденения.

Ключевые слова:

Мафит-ультрамафитовые расслоенные массивы, петрография, петрохимия, геохимия, геодинамика, рудная минерализация.

Введение

В последние несколько десятилетий стали появляться новые данные по Pt-Cu-Ni оруденению, связанному с различными типами ультрамафит-мафитовых формаций разновозрастных подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии, охватывающих обширную территорию Южной Сибири, Казахстана, Монголии и Северного Китая [1–7], что представляет как научный, так и практический интерес. На территории Канской глыбы Восточного Саяна (рис. 1) при проведении ранее геолого-съемочных (ГСР) и прогнозно-металлогенетических работ были выявлены многочисленные тела ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых интрузий, в которых неоднократно отмечалась рудная минерализация меди, никеля и благородных металлов [2, 8]. В 60–80-е гг. XX в. в результате ГСР масштаба 1:50000 в пределах северо-западной части Канской глыбы Восточного Саяна был выделен Талажинский расслоенный плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовый массив, не имеющий по своей формационной принадлежности аналогов в данном регионе. В 2007–2008 гг. в процес-

се поисково-разведочных работ А.Н. Смагиным был выделен небольшой по размерам габбровый Аргысукский массив, который он считает возможным сателлитом Талажинского массива, расположенного к юго-западу на расстоянии 1,5 км. Петрологические исследования авторов подтверждают сходство габброидов обоих массивов. Однако структурная позиция, генезис и металлогенетическая специализация данных объектов, остаются дискуссионными до настоящего времени.

Целью настоящего петрологического исследования является доказательство существенного сходства Талажинского и Аргысукского массивов и возможности их отнесения к единому формационному типу.

Краткая геологическая характеристика исследуемых массивов

Талажинский расслоенный плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовый массив (R_{2-3} по [9]) локализован в пределах северо-западного окончания Канской глыбы на водоразделе верхнего течения рек Дурья и Тазик (рис. 1). На дневной поверх-

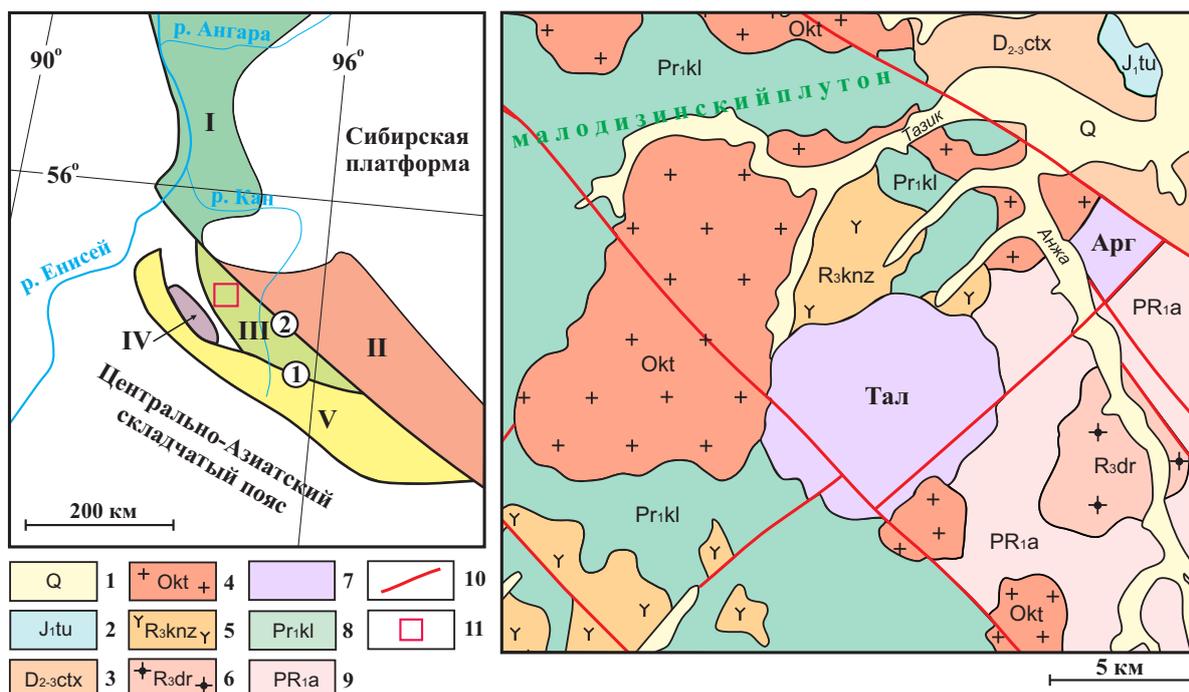


Рис. 1. Геологическая карта района локализации Талажинского и Аргысуцкого массивов в пределах Канской глыбы и ее положение в региональной структуре (составлено по материалам А.Н. Смагина, А.В. Ренжина, А.Г. Еханина, А.Д. Ножкина, О.М. Туркиной, А.И. Чернышова): 1 – четвертичная аллювиальная терригенная формация; 2 – юрская терригенно-угленосная формация: переясловская свита; 3 – средне-верхнедевонская карбонатно-терригенная формация: павловская, кунгусская свиты; 4 – ордовикская лейкогранитовая формация: кутурчинский комплекс; 5 – позднерипеевская габбро-сиенитовая формация: кинзельювский (казырский) комплекс; 6 – позднерипеевская (?) формация микроклиновых гранитов: дербинский, широкологский комплексы (возможно полихронная); 7 – позднерипеевская плагиодунит-троктолит-габбро-анортзитовая формация: Талажинский (Тал) и Аргысуцкий (Арг) массивы; 8 – раннепротерозойская (?) перидотит-пироксенит-габбровая формация: кулибинский комплекс (очевидно, полихронный); 9 – раннепротерозойская (?) орынская толща, преимущественно амфиболитовая с метакоматиитами; 10 – тектонические нарушения; 11 – расположение района исследования в Канской глыбе. На врезке положение Канской глыбы в структурах юго-западного обрамления Сибирской платформы. Выступы кристаллического фундамента платформы: 1 – Ангаро-Канский; 2 – Присяянский. Докембрийские структуры складчатого обрамления: 3 – Канский; 4 – Арзыбейский; 5 – Дербинский блоки. Разломы (цифры в кружках): 1 – Главный Восточносаянский; 2 – Канско-Агульский

Fig. 1. Geological map of the area of Talazhinsky and Argysuisky complexes localization within the Kan block and its position in regional structure (drawn by the data of A.N. Smagin, A.V. Renzhin, A.G. Ekhanin, A.D. Nozhkin, O.M. Turkina, A.I. Chernyshov): 1 – quaternary alluvial terrigenous formation; 2 – Jurassic terrigenous-coal formation: pereyaslav strata; 3 – middle Upper Devonian terrigenous-carbonate formation: pavlovskaya, kungusskaya strata; 4 – Ordovician leucogranite formation: kuturchinsky complex; 5 – late Riphean gabbro-syenitic formation: kinzelyuisky (kazyrsky) complex; 6 – late-Riphean (?) formation of microcline granites: derbinsky, shirokologsky complexes (probably polychromous); 7 – late-Riphean plagioclone-tractolite-gabbro-anorthite formation: Talazhinsky (Tal) and Argysuisky (Arg) complexes; 8 – Early Proterozoic (?) peridotite-pyroxenite-gabbro formation: kulibinsky complex (obviously polychromous); 9 – Early Proterozoic (?) orynskaya formation, essentially amphibolitic with metakomatiites; 10 – tectonic deformations; 11 – position of the area under study in the Kan block. The inset map demonstrates the position of the Kan block in structures of South-West framing of Siberian platform. Highs of platform crystalline basement: 1 – Angara-Kansk; 2 – Sayan. Pre-Cambrian folded framing structures: 3 – Kansk; 4 – Arzybeysky; 5 – Derbinsky blocks. Faults (numbers in circles): 1 – Main East-Sayan; 2 – Kansk-Agulsk

ности массив имеет округлую форму (6×7,5 км²) и сложен преимущественно плагиодунитами и троктолитами при подчиненной роли оливиновых габбро и анортзитов. В его разрезе А.Н. Смагиным (устное сообщение) выделены четыре мегаритма переслаивания снизу вверх плагиодунитов, троктолитов и анортзитов, с маломощными редкими прослоями оливиновых габбро. Подошва массива на юго-востоке падает под массив под углом 30...40° и контактирует с толщей стратифицированных амфиболитов, кальцифиров и мраморов.

По площадным размерам (более 40 км²), породному составу (плагиодуниты, троктолиты, оливиновые габбро и анортзиты), характеру ритмичности (4 горизонта мощностью 180...400 м и пачки по 2...26 м) и другим признакам в пределах Канской глыбы массив не имеет аналогов [10]. Вероятней всего, он представляет рифейскую дунит-троктолит-габбровую формацию, отмеченную на южной окраине Сибирской платформы множеством плохо изученных массивов, из которых некоторые известны своей сульфидной Ni рудоносностью [11].

Аргысукский габбровый массив выделен в самостоятельный объект из Малодизинского плутона, который в настоящее время также требует всестороннего изучения в силу его противоречивой комплексной и возрастной трактовки: пироксенит-габбровый – E_{2-3} по [12], манский существенно габбровый – E_{1-2} (по результатам ГСР 1978–1981 гг. на Кингашской площади под руководством А.Н. Смагина), кулибинский анортозит-пироксенит-габбровый – PR_1 (в легенде к геологической карте района 1:50000). Непосредственно возраст Аргысукского массива не определялся.

Массив расположен северо-восточнее Талажинского плутона на водоразделе истоков рр. Аргысук и Анжа (рис. 1), имеет на поверхности округлую форму ($3 \times 3,5 \text{ км}^2$) и сложен исключительно габброидами. Однако характер аэромагнитного поля на исследуемой территории (по данным А.Н. Смагина, 2008 г.), указывает на наличие в нижней его части пластины ультрамафитов и их практически полную сохранность в результате крайне слабого современного эрозийного среза последних. Учитывая, что весь Аргысукский массив полностью находится в контурах контрастной аэромагнитной аномалии, характеристики которой свойственны только рудоносным ультрамафитам в пределах Канской глыбы, а также наличие по результатам ГСР 1978–1981 гг. контрастного по содержанию (0,01 %) и короткого (1,5 км) потока рассеяния Ni, можно выделить ультрамафиты массива, скрытые на глубине под превалирующими на поверхно-

сти габбро, в ранг весьма перспективных на обнаружение промышленных концентраций Cu и Ni.

Петрографо-минералогическая характеристика пород

Породы Талажинского массива представлены преимущественно плагиодунитами и троктолитами при подчиненной роли анортозитов и оливиновых габбро.

Плагиодуниты – средне-, крупнозернистые (3...8 мм) породы с кумулятивной структурой и массивной текстурой, состоят на 80...90 % из хризолита (Fa_{18-20}) и 5...10 % основного плагиоклаза – битовнита (An_{76-77}) (табл. 1, 2). Акцессорные минералы (до 5 %) представлены преимущественно зернами хромшпинелидов и очень редкими индивидуальными сульфидов (пирротин, пентландит).

Троктолиты – мелко-, крупнозернистые (1...7 мм) иногда порфировидные породы с габбровой структурой. Они состоят на 20...70 % из хризолита ($\text{Fa}_{16,5-17,5}$), на 25...70 % из битовнита (An_{77-81}) и до 10 % из гиперстена и роговой обманки, соответствующей магнезиальной и чермакитовой разновидностям [13]. Нередко в троктолитах отмечается мелкая (до 0,25 мм) вкрапленная магнетит-ильменит-хромшпинелиевая и пирротин-пентландит-халькопиритовая минерализация.

Оливиновые габбро имеют мелкозернистую габбровую структуру, массивную текстуру и сложены битовнитом (An_{78-85}) и лабрадором (An_{66-68}) – 40...50 %, хризолитом (Fa_{17-18}) – 30...40 % и клино-

Таблица 1. Химический состав оливина в породах Талажинского и Аргысукского массивов, мас. %

Table 1. Chemical composition of olivine in rocks of Talazhinsky and Argysuksky complexes, wt. %

Комплекс Complex	Талажинский массив Talazhinsky complex								Аргысукский интрузив Argysuksky intrusive						
	Pl-дунит Pl-dunite		Троктолит Troctolite				Ol-габбро Ol-gabbro		Ol-Hb габбро Ol-Hb gabbro				Ol-Px-Hb габбро Ol-Px-Hb gabbro		
Порода Rock	5014/7-2	5014/7-3	5014-1	5014-2	5014-3	5011-1	5011-2	5003/1-5	5003/1-6	2112/1-1	2112/1-2	2112/1-3	2112/1-8	2141-1	2141-7
Оксид oxide															
SiO ₂	39,003	38,862	39,484	39,756	38,167	39,67	39,976	39,463	39,384	38,709	38,781	39,135	39,016	39,194	38,706
TiO ₂	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,043	<0,044
Al ₂ O ₃	<0,063	<0,060	<0,059	<0,059	<0,062	<0,063	<0,063	<0,063	<0,063	<0,067	<0,065	<0,061	<0,064	<0,091	<0,064
Cr ₂ O ₃	<0,043	<0,044	<0,044	<0,044	<0,043	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,044	<0,043	<0,044	<0,043	<0,044
FeO _{tot}	17,85	17,55	16,20	15,44	15,94	15,77	15,30	16,51	17,08	19,26	17,74	17,90	18,78	18,79	19,30
MnO	0,21	0,26	0,23	0,21	0,23	0,23	0,20	0,27	0,30	0,38	0,37	0,36	0,40	0,36	0,41
MgO	42,25	42,55	43,75	44,34	44,96	44,25	44,54	43,51	43,05	41,08	42,53	42,36	41,53	41,13	40,49
CaO	0,04	<0,033	0,03	<0,033	0,04	<0,032	0,06	<0,033	<0,033	0,08	0,16	<0,032	0,06	<0,032	<0,032
Na ₂ O	0,06	<0,039	<0,039	<0,039	<0,041	<0,041	<0,041	<0,039	<0,039	0,05	<0,041	<0,039	<0,040	<0,058	<0,040
NiO	0,18	0,14	0,17	0,12	0,18	0,21	0,21	0,14	0,12	0,10	0,10	<0,067	0,10	0,10	0,09
Сумма	99,584	99,359	99,87	99,871	99,526	100,13	100,284	99,889	99,935	99,663	99,674	99,75	99,879	99,567	98,992
Fa (мол. %)	19,2	18,8	17,2	16,3	16,6	16,7	16,2	17,6	18,2	20,8	18,9	19,2	20,2	20,4	21,1

Примечание: здесь и далее анализы минералов выполнены на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II XMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA x-sight) INCA Energy 450 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ИЭМ РАН (г. Черногловка) оператором А.Н. Некрасовым. Fa – содержание fayalite молекулы, $Fa = [Fe / (Fe + Mg)] \times 100$; Pl-дунит – плагиодунит; Ol-габбро – оливиновое габбро; Ol-Hb габбро – оливин-роговообманковое габбро; Ol-Px-Hb габбро – оливин-пироксен-роговообманковое габбро.

Note: hereinafter the minerals are analyzed on electron scanning microscope «Tescan Vega II XMU», equipped with energy-dispersive spectrometer (with semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 450 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 in IEM RAS (Chernogolovka) by A.N. Nekrasov. Fa is the content of fayalite molecule, $Fa = [Fe / (Fe + Mg)] \times 100$; Pl-dunite is plagioclite; Ol-gabbro is olivine gabbro; Ol-Hb gabbro is olivine-hornblend gabbro; Ol-Px-Hb gabbro is olivine-pyroxene-hornblend gabbro.

Таблица 2. Химический состав плагиоклаза в породах Талажинского и Аргысукского массивов, мас. %**Table 2.** Chemical composition of plagioclase in rocks of Talazhinsky and Argysuksky complexes, wt. %

Массив Complex	Порода Rock	Образец Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма Sum	An (мол. %)
Талажинский / Talazhinsky	Pl-дунит Pl-dunite	5014/7-6	48,82	0,07	32,69	0,26	<0,051	0,04	15,72	2,62	0,07	100,28	76,5
		5014/7-7	48,01	<0,045	32,61	0,24	<0,051	0,04	15,55	2,51	0,06	99,02	77,1
		5014/7-8	48,88	0,06	32,99	0,27	<0,051	<0,033	15,37	2,67	0,06	100,30	75,8
	Троктолит Troctolite	5014-4	47,97	<0,046	32,15	0,48	<0,051	0,10	16,52	1,98	0,39	99,59	80,4
		5014-5	47,95	0,05	32,90	0,56	<0,050	0,07	15,52	2,53	0,06	99,62	77,0
		5011-4	47,27	0,05	32,73	0,26	<0,050	0,05	16,78	2,14	0,03	99,31	81,1
		5011-5	47,16	<0,045	33,38	0,18	<0,050	0,05	16,25	2,16	<0,029	99,19	80,6
	Ol-габбро Ol-gabbro	5003/1-7	47,24	0,05	33,46	0,30	<0,050	0,04	16,36	2,00	0,08	99,53	81,5
		5003/1-8	47,29	0,05	33,01	0,35	<0,050	0,04	16,78	1,87	0,07	99,45	82,9
		5003/1-9	47,40	0,06	31,66	0,78	<0,051	0,37	18,06	1,58	0,25	100,16	85,1
		5003/1-11	48,12	0,06	33,08	0,21	<0,050	0,05	15,81	2,37	0,08	99,77	78,3
		5003/5-4	51,22	<0,044	31,00	0,65	<0,050	<0,034	13,31	3,80	<0,029	99,98	66,0
		5003/5-5	49,10	<0,045	32,50	0,14	<0,050	0,08	15,28	2,78	<0,029	99,88	75,2
		5003/5-6	50,92	<0,045	30,77	0,46	<0,050	0,05	13,70	3,56	<0,029	99,45	68,0
	Анортозит Anorthosite	5015/1-1	42,29	0,06	32,92	0,55	<0,052	0,11	23,05	0,66	<0,029	99,64	95,0
		5015/1-4	48,62	0,06	32,17	0,54	<0,050	0,13	15,54	2,54	0,07	99,67	76,9
		5015/1-3	41,06	0,06	33,43	0,56	0,09	0,11	24,66	0,07	<0,029	100,03	99,4
		5020/2-1	48,32	<0,045	33,09	0,35	<0,050	0,09	15,84	2,49	0,06	100,24	77,5
		5020/2-2	48,47	<0,045	32,77	0,37	<0,050	0,08	15,82	2,37	0,07	99,95	78,4
		5020/2-3	49,12	0,07	32,62	0,26	<0,051	0,06	14,91	2,91	0,05	100,00	73,7
Аргысукский Argysuksky	Ol-Hb габбро Ol-Hb gabbro	2112/1-4	53,60	0,05	28,76	0,30	<0,049	<0,033	11,64	4,78	0,16	99,29	56,9
		2112/1-5	52,89	0,06	30,03	0,37	<0,050	0,06	11,87	4,51	0,17	99,94	58,7
		2112/1-6	50,18	0,05	31,06	0,24	<0,050	<0,034	14,11	3,30	0,09	99,03	69,8
	Ol-Px-Hb габбро Ol-Px-Hb gabbro	2141-3	49,87	<0,044	31,18	0,53	<0,050	0,91	13,53	3,19	0,05	99,26	69,9
		2141-4	50,43	0,06	31,29	0,69	<0,050	0,21	13,42	3,45	0,19	99,75	67,5
		2141-5	50,33	<0,045	31,14	0,59	<0,050	1,21	13,76	3,13	0,04	100,19	70,7
		2141-6	50,63	0,05	31,41	0,28	<0,050	0,06	13,54	3,68	0,14	99,89	66,5

Примечание: An – содержание анортитовой молекулы, $An = [Ca / (Ca + Na + K)] \times 100$.

Note: An is the content of anorthite molecule, $An = [Ca / (Ca + Na + K)] \times 100$.

пироксеном до 20 %. В них отмечаются мелкие рудные минералы (до 0,5 мм), аналогичные наблюдаемым в троктолитах.

Анортозиты – мелко-, среднезернистые (1...4 мм) породы с панидоморфной структурой, а при наличии ксеноморфного клинопироксена приобретают гипидиоморфную. Характерна массивная текстура. Они на 90...100 % состоят из битовнита (An_{74-88}) либо анортита (An_{95-99}), изредка в их составе до 10 % отмечается клинопироксен. Рудные минералы представлены железотитанистой окисной минерализацией: рутилом, магнетитом, ильменитом и нигрином.

Аргысукский массив слагают габброиды, представленные преимущественно оливин-пироксен-роговообманковыми габбро, которые часто амфиболлизированы. Они обычно имеют массивную текстуру, однако в лейкократовых разностях нередко обнаруживают трахитоидную, обусловленную субпараллельной ориентировкой порфиридных призматических зерен плагиоклаза. Основная масса мелко-, среднезернистая габбро-офитовая с размерами зерен 1...3,5 мм. Габбро сложены главным образом оливином – хризолитом (Fa_{19-21}) ~5...25 %, плагиоклазом – лабрадором (An_{57-70}) ~50...70 % и клинопироксеном до 30 %, встречаются коричне-

во-бурая роговая обманка, биотит (табл. 1, 2). Из вторичных минералов отмечаются уралит, актинолит и хлорит. Рудные минералы распределены неравномерно, иногда до 5 %. Они имеют субизометричную либо ксеноморфную форму и размеры менее 1 мм.

Вокруг рудных минералов часто встречаются венцовые каймы роговой обманки, либо биотита.

Особенности минералогического состава

Распределение фигуративных точек составов оливинов и плагиоклазов из габброидов обоих массивов на бинарных диаграммах (рис. 2) обнаруживают отчетливые тренды, отражающие эволюционную направленность изменения состава минералов в процессе их кристаллизации из производных дифференцированных магматических расплавов. При этом оливины и плагиоклазы из габброидов Аргысукского массива кристаллизовались из наиболее поздних порций дифференцированных основных расплавов. Оливин в породах Аргысукского массива отличается от Талажинского меньшими содержаниями MgO, SiO₂ и большими FeO, а плагиоклаз – меньшими содержаниями CaO, Al₂O₃ и большими SiO₂. При этом составы плагиоклазов из оливиновых габбро обоих массивов перекрываются.

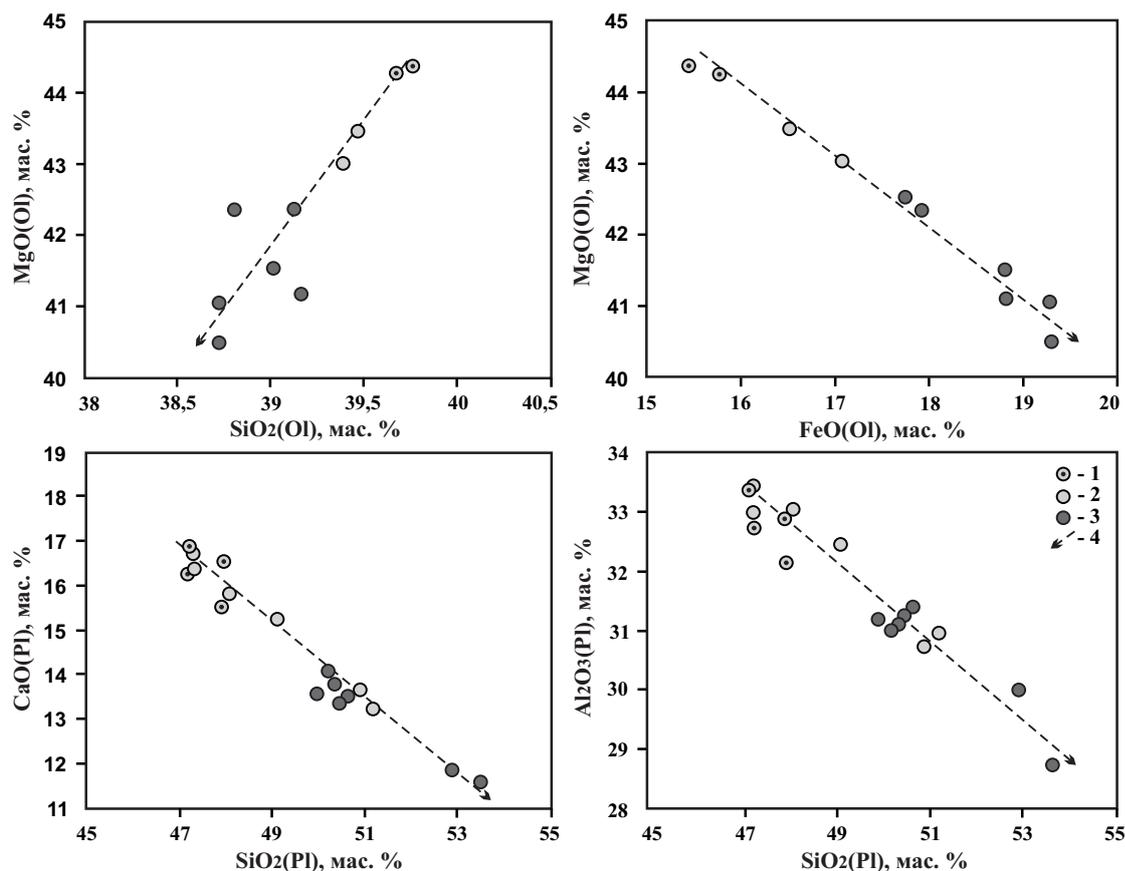


Рис. 2. Бинарные диаграммы для оливинов (OI) и плагиоклазов (Pl) из габброидов исследуемых массивов: 1 – троктолиты Талажинского массива; 2 – оливиновые габбро Талажинского массива; 3 – габброиды Аргысукского массива; 4 – эволюционный тренд магматического расплава

Fig. 2. Binary diagrams for olivines (OI) and plagioclases (Pl) from gabbroids of the considered complexes: 1 – troctolites of Talazhinsky complex; 2 olivinic gabbro of Talazhinsky complex; 3 – gabbroids of Argysuksky complex; 4 – evolution trend of magmatic melt

Петрохимические особенности

Для Талажинского и Аргысукского массивов фигуративные точки ультрамафитов и габброидов на бинарных диаграммах (рис. 3, а, б) образуют линейное распределение в виде единого эволюционного тренда. При снижении содержаний MgO в породах от ультрамафитов к габброидам отмечается уменьшение FeO и увеличение содержаний CaO и Al₂O₃, при этом габброиды Аргысукского массива ложатся в область оливиновых габбро Талажинского массива.

На других бинарных диаграммах (рис. 3, в, г) оливиновые габбро Талажинского массива и габброиды Аргысукского массива отклоняются от общей тенденции основного эволюционного тренда и формируют самостоятельный «гибридный» тренд. Он характеризуется постепенным незначительным уменьшением глиноземистости и незначительным увеличением железистости по мере увеличения роли кремнезема в данных породах. Эти породы отличаются повышенными содержаниями TiO₂, Na₂O, K₂O и P₂O₅ по сравнению с общей тенденцией, вытекающей из основного тренда фракционирования.

Появление «гибридного» тренда в габброидах Талажинского и Аргысукского массивов сближает их с аналогичными породами массивов Войсис-Бей (Лабрадор, Канада) и Йоко-Довыренский (Северное Прибайкалье, Россия) [14–16], с которыми связаны сульфидные медно-никелевые месторождения. Такое сходство позволяет отнести исследуемые массивы в разряд перспективных на обнаружение медно-никелевого оруденения.

Геохимические особенности

Ультрамафиты и габброиды Талажинского массива и габброиды Аргысукского массива характеризуются практически однотипными по форме графиками распределения редкоземельных элементов (РЗЭ). Однако габброиды Аргысукского массива отличаются более высокими (на порядок выше) концентрациями РЗЭ (рис. 4, а), что, очевидно, связано с образованием из наиболее поздних дифференцированных расплавов. Это подтверждает результаты петрохимического исследования. Для пород обоих массивов характерен выраженный Eu-максимум, который наиболее отчетливо проявлен в Талажинском массиве (ультрама-

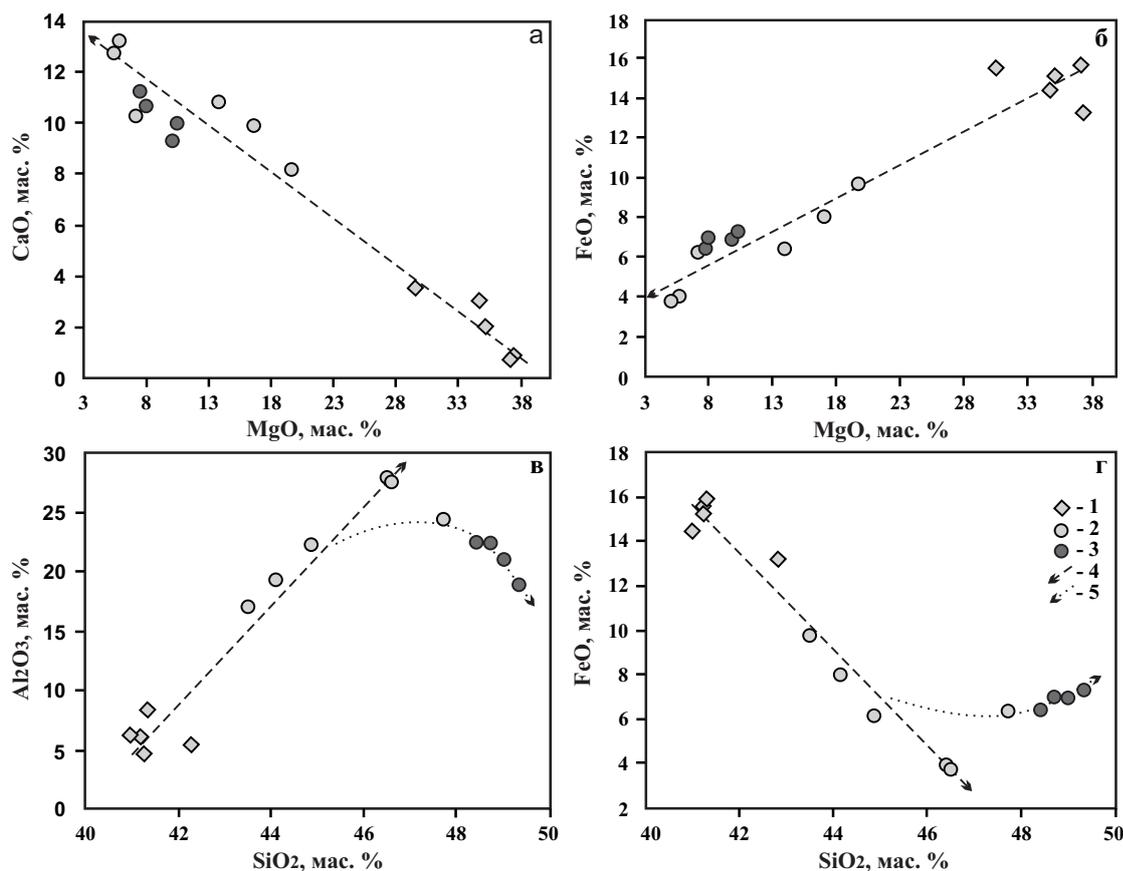


Рис. 3. Бинарные диаграммы для пород исследуемых массивов: 1– ультрамафиты Талажинского массива; 2 – габброиды Талажинского массива; 3 – габброиды Аргысуцкого массива; 4 – основной эволюционный тренд магматического расплава; 5 – «гибридный» тренд, характерный для рудоносных пород рифейской дунит-троктолит-габбровой формации

Fig. 3. Binary diagrams for rocks of the considered complexes: 1– ultramafites of Talazhinsky complex; 2 – gabbroids of Talazhinsky complex; 3 – gabbroids of Argysuisky complex; 4 – main evolution trend of magmatic melt; 5 – «hybrid» trend, typical for ore-bearing rocks of Riphean dunite-troctolite-gabbro formation

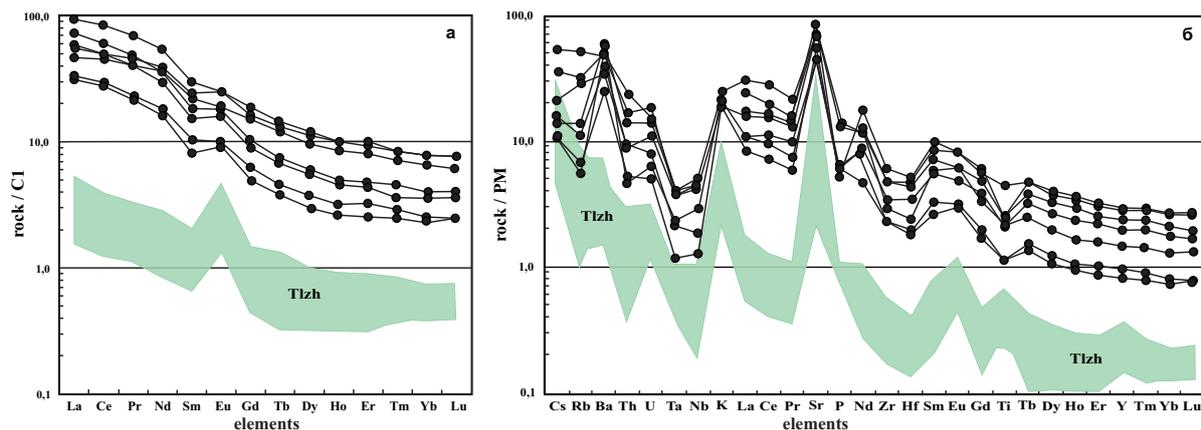


Рис. 4. Диаграммы распределения элементов лантаноидной группы (а), нормированных по углисту хондриту C1 [17] и спайдер-диаграммы для наиболее распространенных примесных элементов (б), нормированных по примитивной мантии [18] в породах Талажинского (зеленое поле Tlzh) и габброидах Аргысуцкого массивов

Fig. 4. Diagrams of distribution of lanthanide group elements (a), normalized by chondrite carbonaceous C1 [17] and spider plots for the most wide-spread doping elements (б), normalized by primitive mantle [18] in rocks of Talazhinsky (green field Tlzh) and gabbroids of Argysuisky complexes

фиты: $(Eu/Eu^*)_n = 1,48...2,61$; габброиды: $(Eu/Eu^*)_n = 2,11...3,97$ и «затухает» в габброидах Аргысуцкого массива $((Eu/Eu^*)_n = 1,03...1,42)$. Породы массивов имеют общий пологий отрицательный наклон спектров, что обусловлено постепенным уменьшением концентраций РЗЭ от легких к тяжелым (талажинские: $(La/Yb)_n = 3,49...8,98$; аргысуцкие: $(La/Yb)_n = 6,32...18,52$).

Сопоставление распределения примесных элементов в породах рассматриваемых массивов на многокомпонентной диаграмме (рис. 4, б) также обнаруживает их большое геохимическое сходство. При этом в Аргысуцком массиве породы отличаются более высокими концентрациями этих элементов. В обоих массивах отмечаются Ba, U, K, Sr, Sm-Eu положительные пики и Rb, Th, Ta-Nb, La-Ce-Pr, Zr-Hf отрицательные пики. Отличие заключается в отсутствии в габброидах Аргысуцкого массива небольшого Y положительного пика, характерного для пород Талажинского массива, а также отрицательная природа Ti пика, который для пород Талажинского массива на спектрах положительен.

Интерпретация геодинамической обстановки

Как было показано авторами ранее [19], формирование Талажинского массива происходило в обстановке островной дуги. В пользу данного вывода указывает преобладание в составе расслоенной серии пород массива троктолитов, присутствие линз и прослоев анортозитов с высокой основностью плагиоклаза (An_{75-99}), постоянное присутствие в ультрамафитах плагиоклаза (до 15 %) [20]. Поми-

мо этого, габброиды массива по минералогическим особенностям и химизму близки алливалитовым и эвкритовым включениям в современных островодужных вулканитах [21].

Использование диаграмм Zr/Nb–Tb/Th и Nb/Y–Zr/Y (рис. 5), предложенных К. Конди [22], позволяет смоделировать геодинамическую обстановку кристаллизации Талажинского и Аргысуцкого массивов и предположить возможный источник вещества, из которого произошло зарождение общего родоначального расплава.

На диаграмме Nb/Y–Zr/Y фигуративные точки составов пород Талажинского массива попадают в поле базальтов океанического плато и изначально близки примитивной мантии. Габброиды Аргысуцкого массива формируют фигуративный рой точек, сменяющий пространственно габброиды Талажинского массива. Они смещаются с поля базальтов океанических плато и преимущественно ложатся в поле базальтов океанических островов. В ориентации пород обоих массивов отчетливо отмечается влияние на исходное вещество источника субдукционных флюидов.

На второй диаграмме Zr/Nb–Tb/Th фигуративные точки составов пород как Талажинского, так и Аргысуцкого массивов формируют достаточно компактный единый рой в области островодужных базальтов. При этом составы пород близки к компонентно обогащенному расплаву (рис. 5).

Полученные результаты позволяют предположить следующий сценарий генерации и эволюции магматического расплава при формировании пород Талажинского и Аргысуцкого массивов. Ис-

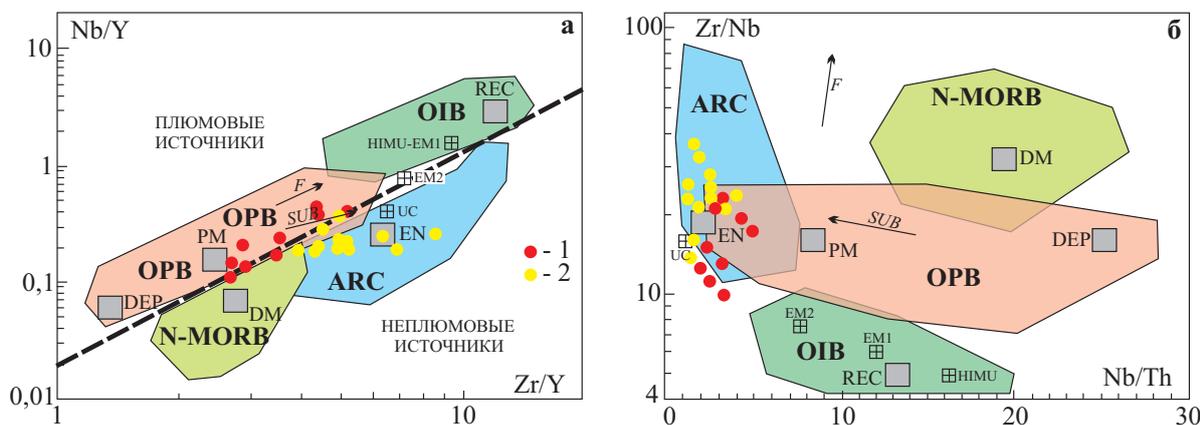


Рис. 5. Положение составов пород Талажинского (красные кружки) и Аргысуцкого (желтые кружки) массивов на диаграммах Zr/Nb–Tb/Th и Nb/Y–Zr/Y [22]: UC – верхняя континентальная кора; PM – примитивная мантия; DEP – глубинная деплетированная мантия; REC – рециклированный компонент; EN – обогащенный компонент; HIMU – источник с высоким отношением U/Pb; EM1 и EM2 – обогащенные мантийные источники; ARC – островодужные базальты; N-MORB – базальты срединно-океанических хребтов; OIB – базальты океанических островов; OPB – базальты океанических плато. Стрелками показаны эффекты частичного плавления (F) и влияния субдукционных флюидов (SUB). Утолщенная штриховая линия на диаграмме – вероятная граница, разделяющая плюмовые и неплюмовые источники

Fig. 5. Position of rock composition of Talazhinsky (red circles) and Argysuksky (yellow circles) complexes on the diagrams Zr/Nb–Tb/Th and Nb/Y–Zr/Y [22]: UC is the upper continental crust; PM is the primitive mantle; DEP is the deep depleted mantle; REC is the re-cycled component; EN is the enriched component; HIMU is the source with high U/Pb ratio; EM1 and EM2 are the enriched mantle sources; ARC are the island-arc basalts; N-MORB are the basalts of mid-ocean ridges; OIB are the basalts of oceanic islands; OPB are the basalts of oceanic uplands. The effects of partial melting (F) and impact of subduction fluids (SUB) are marked by the arrows. The heavy dashed line on the diagram is the likely bound separating plum and non-plum sources

ходным веществом для зарождения родоначального расплава явились, очевидно, толеитовые базальты океанического плато, близкие по составу примитивной мантии. При поглощении океанической коры с плато в зоне субдукции происходило ее расплавление с образованием магматического расплава, который в последующей эволюции внедрялся по ослабленным зонам в верхние части земной коры и сопровождался контаминацией материала вмещающих пород. В пользу последнего предположения служат высокие нормативные содержания типичных коровых элементов – Ва и Sr – в породах исследуемых массивов [14]. В магматической камере в процессе кристаллизационной дифференциации происходило формирование расслоенной мафит-ультрамафитовой серии пород, представленной наиболее полно в обнаженной части Талажинского массива и частично в Аргысукском.

Выводы

Проведенные петрологические исследования позволяют судить о высоком сходстве Талажинского плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитового и Аргысукского габбрового массивов, расположенных в северо-западной части Восточного Саяна. Авторы допускают, что дополнительные детальные исследования этих объектов позволят впоследствии при совершенствовании региональных схем корреляции объединить их в единый формацион-

ный комплекс. Возможно, оба массива вообще представляют собой единое интрузивное тело, которое сформировалось в условиях островной дуги из исходного высокоглиноземистого оливин-базальтового расплава, для которого характерны повышенная магнезиальность при низких концентрациях HFSE (Ti, Zr, REE), обогащенность LREE, положительная Eu-аномалия. Проявленные на мультиэлементных спектрах сравниваемых массивов отчетливые Ta-Nb-минимумы и Ba, Sr-максимумы позволяют предполагать, что формирование очагов исходных расплавов происходило за счет толеитовых базальтов океанического плато при их плавлении в зоне субдукции. Последующая эволюция расплава обусловлена процессами его перемещения в земной коре, которые сопровождалась контаминацией вмещающих пород. Расслоенность интрузии, в свою очередь, очевидно, обусловлена процессами магматической и кристаллизационной дифференциации в магматической камере.

Талажинский и Аргысукский массивы можно отнести к разряду перспективных объектов на выявление медно-никелевого оруденения, так как слагающие их породы обнаруживают значительное сходство по особенностям вещественного состава с аналогичными породами массивов Войсис-Бей (Лаборатория, Канада) и Йоко-Довыренский (Северное Прибайкалье, Россия), с которыми связаны Pt-Cu-Ni месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы / Л.В. Агафонов., Ж. Лхамсүрэн, К.С. Кужугет, Ч.К. Ойдул. – Улаанбаатар: Монгольский государственный университет науки и технологии, 2005. – 224 с.
2. Геология и перспективы сульфидного Pt-Cu-Ni оруденения Восточной части Алтае-Саянской складчатой области / С.С. Сердюк, В.А. Кириленко, Г.Р. Ломаева, В.Е. Бабушкин, А.В. Тарасов, А.И. Зверев. – Красноярск: Изд-во «Город», 2010. – 184 с.
3. Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // Руды и металлы. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
4. Поляков Г.В., Изов А.Э., Кривенко А.П. Платиноносные ультрамафит-мафитовые формации подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 12. – С. 1227–1241.
5. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64–70.
6. Черкасова Т.Ю., Мазуров А.К., Чернышов А.И. Потенциальная рудоносность расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов Нижнедербинского комплекса (СЗ Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 20–27.
7. Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China / J. Lehmann, N. Arndt, B. Windley, M.-F. Zhou, C.Y. Wang, C. Harris // Econ. Geol. – 2007. – V. 102. – P. 75–94.
8. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богникова, А.П. Кривенко, А.Э. Изова и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
9. Зеленокаменные пояса юго-западного обрамления Сибирской платформы и их металлогения / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханин, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин. – Красноярск: КНИИГиМС, 2004. – 176 с.
10. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Конников Э.Г. Талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый массив Восточного Саяна: петрохимические особенности и проблемы рудоносности // Геология и геофизика. – 2013. – № 2. – С. 219–236.
11. Кислов В.Е., Конников Э.Г. Рифейская эпоха платинометалло-медно-никелевого рудообразования // Проблемы геологии и геохимии юга Сибири. – Томск: Изд-во ТГУ, 2000. – С. 67–72.
12. Яцук В.И. Магматические комплексы зоны Манского разлома (Восточный Саян): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Канск, 1975. – 124 с.
13. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names / B.E. Leake, A.R. Woolley, C.E.-S. Arps, W.D. Birch, M.Ch. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, A. Kato, H.J. Kisch, V.G. Krivovichev, K. Linthout, J. Laird, J.A. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.-S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.-N. Stephenson, L. Ungaretti, E.J.-W. Whittaker // Canadian Mineralogist. – 1997. – V. 35. – P. 219–246.
14. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. – СПб.: СПбГУ, 2003. – 487 с.
15. Кислов В.Е. Йоко-Довыренский расслоенный массив. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1998. – 265 с.
16. Довыренский интрузивный комплекс: проблемы петрологии и сульфидно-никелевой минерализации / А.А. Арискин, Э.Г. Конников, Л.В. Данюшевский, В.Е. Кислов, Г.С. Никола-

- ев, Д.А. Орсов, Г.С. Бармина, К.А. Бычков // Геохимия. – 2009. – № 5. – С. 451–480.
17. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
18. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. Spec. Publ.* – 1989. – № 42. – P. 313–345.
19. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Родоначальный расплав и геодинамика расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна // *Известия Томского политехнического университета.* – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 128–135.
20. Высокоглиноземистые расслоенные габброиды Центрально-Азиатского складчатого пояса (геохимические особенности, возраст и геодинамические условия формирования) / А.Э. Изов, Г.В. Поляков, А.С. Гибшер, П.А. Балыкин, Д.В. Журавлев, В.А. Пархоменко // *Геология и геофизика.* – 1998. – Т. 39. – № 11. – С. 1565–1577.
21. Габброидные ассоциации различных геодинамических обстановок (на примере Центрально-Азиатского складчатого пояса) / А.Э. Изов, Р.А. Шелепаев, А.В. Лавренчук, В.В. Егорова // *Современные задачи петрологии и геодинамики в развитии концепции рационального природопользования: матер. школы-семинара.* – Томск: ЦНТИ, 2006. – С. 71–82.
22. Condie K. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos.* – 2005. – V. 79. – P. 491–504.

Поступила 07.07.2014 г.

UDC 552.321.6:553.08

TALAZHINSKY AND ARGYSUKSKY COMPLEXES: PETROLOGO-GEOCHEMISTRY COMMON TRAITS (NORTHWEST OF EASTERN SAYAN)

Alexey N. Yurichev,

Cand. Sc., National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: juratur@sibmail.com

Alexey I. Chernyshov,

Dr. Sc., National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: aich@ggf.tsu.ru

Relevance of the research is caused by the need of detailed petrological studies of numerous potentially mineralized mafic-ultramafic massifs of the Kan block of the Eastern Sayan to improve the correlation of regional schemes, and to identify in them Pt-Cu-Ni mineralization.

The main aim of the study is to proof the substantial similarity of Talazhinsky and Argysuksky massifs and their possible inclusion in a single formational type.

The methods used in the study: petrographic characteristics on the polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss, petrochemical composition of rocks by RFA, and rare earth elements by ICP-MS, the chemical composition of minerals on the scanning electron microscope Tescan Vega II XMU, equipped with energy-dispersive spectrometry (with a semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 450 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

The results. The authors have studied the petrological and geochemical features of Talazhinsky and Argysuksky massifs of the Kansk block of the Eastern Sayan and revealed their high similarity. They admit that further detailed studies of these objects allow combining them into a single formation complex when improving regional schemes of correlation. It was assumed that both massifs are a unified intrusive body, which was formed under the conditions of the island arc from original high-alumina olivine-basalt melt. The emergence of foci of the initial melt occurred from tholeiitic basalts of oceanic plateau at their melting in the subduction zone. The subsequent evolution of the melt is conditioned by its movement in the earth's crust, accompanied by contamination of the host rocks. Stratification of intrusion, is obviously caused by magmatic crystallization and differentiation in the magma chamber. Both massifs are classified as promising objects for identifying copper-nickel mineralization.

Key words:

Mafic-ultramafic layered massifs, petrography, petrochemistry, geochemistry, geodynamic, ore mineralization.

REFERENCES

1. Agafonov L.V., Lkhamsuren J., Kuzhuget K.S., Oydup Ch.K. *Platinosnost ultramafit-mafitov Mongolii i Tuva* [Ultramafic-mafic PGE of Mongolia and Tuva]. Ulaanbaatar, Mongolian University of Science and Technology, 2005. 224 p.
2. Serdyuk S.S., Kirilenko V.A., Lomaeva G.R., Babushkin V.E., Tarasov A.V., Zverev A.I. *Geologiya i perspektivy sulfidnogo Pt-Cu-Ni orudneniya Vostochnoy chasti Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Geology and prospects of sulfide Pt-Cu-Ni mineralization of eastern part of the Altay-Sayan folded area]. Krasnoyarsk, Gorod Publ., 2010. 184 p.
3. Yurichev A.N. Mafit-ultramafitovy magmatizm Kanskoy glyby i ego rudny potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana [Mafic-ultramafic magmatism of Kansk block and its ore potential, NW Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
4. Polyakov G.V., Izokh A.E., Krivenko A.P. Platinosnye ultramafit-mafitovyye fopmatsii podvizhnykh poyacov Tsentralnoy i Yugo-Vostochnoy Azii [Pt-bearing ultramafic-mafic formations of mobile belts in Central and South-Eastern Asia]. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 12, pp. 1227–1241.
5. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya peridotitov i gabbroidov kulibinskogo kompleksa (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of peridotites and gabbros of the Kulibinsky complex (north-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70.
6. Cherkasova T.Yu., Mazurov A.K., Chernyshov A.I. Potentsialnaya rudonosnost rassloennykh mafit-ultramafitovykh massivov Nizhnederbinskogo kompleksa [Potential ore-bearing of layered mafic-ultramafic massifs of the Nizhnederbinsky complex (NW East Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 20–27.
7. Lehmann J., Arndt N., Windley B., Zhou M.-F., Wang C.Y., Harris C. Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China. *Econ. Geol.*, 2007, vol. 102, pp. 75–94.
8. *Platinosnost ultrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri* [PGE mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Ed. V.I. Bog-nibova, A.P. Krivenko, A.E. Izokh. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, Branch «Geo», 1995. 151 p.
9. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. Zelenokamennyye poyasa yugo-zapadnogo obramleniya Sibirskoy platformy i ikh metallogeniya [Greenstone belts of southwestern framing of the Siberian platform and their metallogeny]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2004. 176 p.
10. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov E.G. Talazhinsky plagiodunit-troktolit-anortozit-gabbrovyy massiv Vostochnogo Sayana: petrogeokhimicheskie osobennosti i problemy rudonosnosti [The Talazhin plagiodunit-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 219–236.
11. Kislov V.E., Konnikov E.G. Rifeyskaya epokha platinometalno-medno-nikelevogo rudoobrazovaniya [Riphean era of PGE-copper-nickel mineralization]. *Problemy geologii i geokhimii yuga Sibiri* [Problems of Geology and Geochemistry of southern Siberia]. Tomsk, Tomsk State University, 2000. pp. 67–72.
12. Yashchuk V.I. *Magmaticheskie komplekсы zony Manskogo razloma (Vostochny Sayan)*. Dis. Kand. nauk [Magmatic complexes of Manky fault zone (Eastern Sayan). Cand. Diss.]. Kansk, 1975. 124 p.
13. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.-S., Birch W.D., Gilbert M.Ch., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Mar-resch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.-S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.-N., Ungaretti L., Whittaker E.J.-W. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canadian Mineralogist*, 1997, vol. 35, pp. 219–246.
14. Naldrett A.J. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh i platinometalnykh rud* [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel and PGE ore]. St-Petersburg, SPbSU press, 2003. 488 p.
15. Kislov E.V. *Yoko-Dovyrensky rassloennyy massiv* [Yoko-Dovyrensky layered massif]. Ulan-Ude, BSC SB RAS Publ., 1998. 265 p.
16. Ariskin A.A., Nikolaev G.S., Barmina G.S., Bychkov K.A., Konnikov E.G., Danyushevsky L.V., Kislov E.V., Orsoev D.A. Dovyrensky intruzivnyy kompleks: problemy petrologii i sulfidno-nikelevoy mineralizatsii [The Dovyren intrusive complex: problems of petrology and Ni sulfide mineralization]. *Geochemistry International*, 2009, no. 5, pp. 451–480.
17. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.
18. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, no. 42, pp. 313–345.
19. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rodonachalny rasplav i geodinamika rassloennykh mafit-ultramafitovykh massivov Kanskoy glyby Vostochnogo Sayana [Parental melt and geodynamics of the layered mafic-ultramafic massifs of the Kan block of Eastern Sayan]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 128–135.
20. Izokh A.E., Polyakov G.V., Gibsher A.S., Balykin P.A., Zhuravlev D.Z., Parkhomenko V.A. Vysokoglinozemistyye rassloennyye gabbroidy Tsentralno-Aziatskogo skladchatogo poyasa (geokhimicheskie osobennosti, vozrast i geodinamicheskie usloviya formirovaniya) [High-alumina foliated gabbroides of Central Asian Fold Belt (geochemical characteristics, age and geodynamic conditions of formation)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1998, vol. 39, no. 11, pp. 1565–1577.
21. Izokh A.E., Shelepaev R.A., Lavrenchuk A.V., Egorova V.V. Gabbroidnye assotsiatsii razlichnykh geodinamicheskikh obstanovok (na primere Tsentralno-Aziatskogo skladchatogo poyasa) [Gabbro associations of different geodynamic settings (by the example of Central Asian fold belt)]. *Materialy shkoly-seminara «Sovremennyye zadachi petrologii i geodinamiki v razvitiy kontseptsii ratsionalnogo prirodopolzovaniya»* [Materials of school-seminar. Current issues of petrology and geodynamics in the development of the concept of environmental management]. Tomsk, CNTI, 2006. pp. 71–82.
22. Condie K. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 2005, vol. 79, pp. 491–504.

Received: 07 July 2014.

УДК 552.574:550.4 (571.1)

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рихванов Леонид Петрович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Усольцев Дмитрий Георгиевич,

аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: usoltsev_d@mail.ru

Ильенок Сергей Сергеевич,

ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: ilenokss@tpu.ru

Ежова Александра Викторовна,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных
ископаемых Института природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: eav@tpu.ru

Актуальность работы определяется необходимостью исследований потенциально ураноносных черносланцевых образований Западной Сибири с целью расширения минерально-сырьевой базы России.

Цель работы: выявить геохимическую и минералогическую специализацию отложений баженовской свиты с использованием современных методов исследований, а также их потенциал в качестве источника урана.

Методы исследования. Химический состав определен методом инструментального нейтронно-активационного анализа; для уточнения состава минерализации использовался сканирующий электронный микроскоп HITACHI S-3400N; особенности пространственного распределения урановой минерализации установлены при помощи метода осколочной (f) радиографии.

Результаты. Отложения баженовской свиты в 3 и более раза обогащены U, Zn, Sr, Ba и в 1,5 раза – Co и Tb, а также обеднены Au, Sm, La, Cr, Rb относительно мировых черных сланцев. Корреляция между химическими элементами указывает на наличие двух чётких альтернативных геохимических ассоциаций: кластофильной (Na, Sc, Cr, Rb, Cs, La, Sm, Hf) – элементы, связанные с Th и Ta (обычные компоненты терригенной минеральной фракции), и органофильной (Zn, As, Sb, Ba, Au, U) – элементы, связанные с органическим веществом. Обращает на себя внимание низкое содержание Vg в этой толще. Оценочное среднее содержание урана в породах составляет 41,2 г/т. Распределение урана в породах крайне неравномерное. Высокие концентрации элемента отчётливо приурочены к остаткам органического материала, представленного радиоляриями и ихтиофауной. Выявленные минеральные агрегаты урана представлены оксидами урана, которые находятся в форме микровключений в кальциево-фосфатно-кремнистой скрытокристаллической массе с высоким содержанием углерода. Ряд химических элементов, Fe, S, Zn, Ba, Sr, As, Sb, U, и редкоземельные элементы, имеющие повышенные концентрации, образуют собственные минеральные формы. Значительным развитием в породах пользуется сульфид железа, находящийся как минимум в трёх морфологических формах. Также широко распространены минеральные формы бария (барит?), стронция (стронцианит?). Цинк встречается как в форме сульфида цинка (сфалерит?), так и в виде интерметаллических соединений с Cu, Sb, As. Иногда встречаются минералы редкоземельных элементов, Sn, Pb. Не выявлены собственные минеральные формы Mo, Ni и V, не смотря на то, что их содержания в породах высокие.

Ключевые слова:

Западная Сибирь, верхняя юра – нижний мел, баженовская свита, черные сланцы, ураноносность.

Введение

Отложения баженовской свиты верхней юры (волжский ярус) – нижнего мела (берриасский ярус) рассматриваются в настоящее время как черносланцевая толща [1–7 и др.]. Черные сланцы –

это геологические образования, отличительной чертой которых является обогащенность органическим веществом. Эти породы повсеместно обладают повышенными концентрациями P, U, Mo, V, As, Zn, Cu, Ni, Au, Pd и некоторых других химиче-

ских элементов [8, 9]. Они являются отчетливыми стратонами, обозначающими некоторые рубежи в истории земли [10]. Многими исследователями они рассматриваются как наиболее вероятные нефтематеринские толщи [11, 12 и др.].

С черными сланцами связаны крупнейшие ресурсы и месторождения фосфора, урана, золота, полиметаллов, редких металлов и других химических элементов. Эти факторы предопределили внимание к баженовской свите широкого круга специалистов наук о Земле: литологов, геохимиков и других, включая геологов-рудников.

Несмотря на значительный объем ранее проведенных работ, выполненных по баженовской толще в основном в 60–80-е гг. XX в. [13–19 и др.], геохимические и минералогические особенности рассматриваемых отложений всё ещё являются недостаточно изученными с точки зрения минерального химического состава, условий и причин формирования повышенных концентраций ряда химических элементов и ряда других вопросов.

С разработкой средств и методов ядерно-физических исследований и современных методов электронной микроскопии появились новые возможности исследования геологических объектов.

Эти методы уже начинают использоваться и для изучения отложений баженовской свиты. Так, Ю.Н. Занин и др. [3] охарактеризовали полный спектр редкоземельных элементов, определённых современным аналитическим инструментальным нейтронно-активационным методом.

Материалы и методы

Исходным материалом послужили 18 образцов баженовской свиты Западной Сибири, отобранные из керна скважин, пробуренных на 8 площадях в Томской области (рис. 1), предоставленных А.В. Ежовой.

Химический состав отложений баженовской свиты определялся методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории кафедры ГЭГХ на базе исследовательского ядерного реактора ТПУ по аттестованному методикам (аналитики А.Ф. Судыко, Л.Ф. Богутская). ИНАА является неструктивным и высокочувствительным видом анализа. Он эффективен для определения редких, редкоземельных и радиоактивных элементов с хорошими метрологическими параметрами.

Процедура статистической обработки включает оценку среднего арифметического на уровне значимости 0,05: $\bar{X} \pm \Delta X = \bar{X} \pm SE \times t(p, f)$, где \bar{X} – среднее арифметическое; ΔX – доверительный интервал; SE – стандартная ошибка среднего; t – критерий Стьюдента; p – принятая доверительная вероятность; f – число степеней свободы. $f = n - 1$, где n – количество проб.

По образцам с максимальными содержаниями урана выполнялись исследования особенностей его распределения в породе методом осколочной (f) ра-

диографии. Метод осколочной (f) радиографии позволяет с высокой чувствительностью и точностью выявить пространственное распределение урана [23]. Метод основан на процессе деления ядер урана-235 под воздействием тепловых нейтронов в ядерном реакторе. Осколки деления ядер оставляют на детекторе дефектные области (треки), которые обнаруживаются под микроскопом после химического травления детектора. В качестве детектора использовалась слюда.

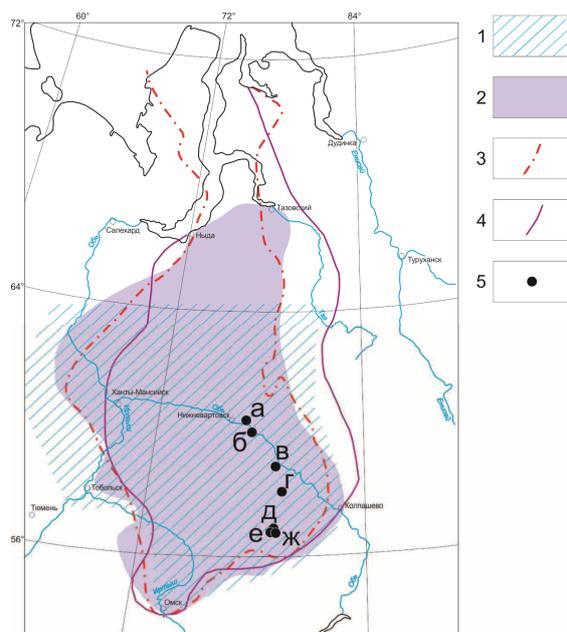


Рис. 1. Схематическая карта распространения отложений баженовской свиты, с указанием мест нахождения скважин, по которым проводилось детальное исследование: 1 – границы распространения пород с повышенной радиоактивностью по [5]; 2 – граница области битуминозных пород по [20]; 3 – граница распространения баженовской свиты по [21]; 4 – граница распространения отложений баженовской свиты по [22]; 5 – места отбора образцов (площади): а – Вахская; б – Фобосская; в – Трассовая; г – Ясная; д – Герасимовская; е – Широкая; ж – Северо-Калиновская

Fig. 1. Contour map of the Bazhenov formation deposit distribution. The map indicates well locations which were investigated in details: 1 are the boundaries of propagation of rocks with increased radioactivity according to [5]; 2 is the boundary of bituminous rocks area according to [20]; 3 is the boundary of the Bazhenov formation propagation according to [21]; 4 is the boundary of the Bazhenov formation deposits propagation according to [22]; 5 are the sampling points (areas): а – Vakhskaya; б – Foboskaya; в – Trassovaya; г – Yasnaya; д – Gerasimovskaya; е – Shirotnaya; ж – Severo-Kalinovaya

Для получения характеристики минерального состава породы проводилось классическое изучение прозрачных и полированных шлифов.

Для изучения минерального состава использовался сканирующий электронный микроскоп HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Элементная составляющая была получена при фиксировании тормозяще-

го рентгеновского излучения. При этом определялись элементы от Li до U включительно с нижним пределом обнаружения 0,1–0,2 весовых %. Для получения изображения обычно использовались вторичные электроны, дающие топографическое изображение поверхности образца. Использование обратно рассеянных (отраженных) электронов дает информацию о распределении элементов поверхности по среднему атомному номеру макрокомпонентов.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования химического состава пород баженовской свиты по данным ИНАА представлены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические оценки химического элементного состава отложений баженовской свиты

Table 1. Statistic estimates of chemical elemental composition of the Bazhenov formation deposits

Элемент Element	Среднее, г/т Average, g/t	Диапазон Range
Na	0,75 ± 0,13	0,09–1,19
Ca	1,42 ± 1,03	0,5–9,65
Sc	14,6 ± 1,7	5,88–20,2
Cr	78,3 ± 11,4	15–132,4
Fe	5,77 ± 3,59	1,41–32,43
Co	27,6 ± 7,6	7,76–73,2
Zn	463 ± 168	75,4–1177
As	41,8 ± 12,3	0,25–86,9
Br	<0,9	<0,9
Rb	71 ± 13,1	4,9–121,4
Sr	589 ± 359	40–3423
Ag	<0,7	<0,7
Sb	3,62 ± 0,97	1,2–8,13
Cs	6,28 ± 1,14	0,44–9,49
Ba	1726 ± 1217	650–10967
La	17,08 ± 6,43	0,05–39,5
Ce	49,4 ± 7,7	13,3–84,2
Nd	24,2 ± 3,6	7,6–40
Sm	3,12 ± 0,96	0,08–5,7
Eu	1,52 ± 0,31	0,35–3,47
Tb	0,99 ± 0,22	0,26–2,25
Yb	3,46 ± 0,63	1,49–7,31
Lu	0,47 ± 0,08	0,21–0,93
Hf	3,09 ± 0,45	0,16–4,48
Ta	0,54 ± 0,13	0,04–0,97
Au	0,006 ± 0,003	0,001–0,018
Th	5,97 ± 1,08	0,9–9,8
U	41,2 ± 20,8	2,37–171

Примечание: Содержание Fe, Ca, Na даны в %, остальные – в г/т. Доверительные интервалы отвечают уровню значимости 0,05. Выделены элементы с повышенной концентрацией относительно состава пелагических глин по [24].

Note: Fe, Ca, Na contents are in %, the rest values are in g/t. Confidence intervals satisfy the significance level 0,05. The elements with increased concentration relative to pelagic clays according to [24] are highlighted in bold.

Сравнительный анализ представленных данных по изученным нами элементам с данными для чёрных сланцев, ранее приведенными М.П. Кетрис и Я.Э. Юдовичем [24], обращает внимание,

что отложения баженовской свиты севера обогащены U, Zn, Sr, Ba и в 1,5 раза – As, Co и Tb, а также обеднены Au, Sm, La, Cr, Rb (рис. 2).

Наиболее близким современным аналогом баженовских отложений по полученным данным являются сапропелевые илы Черного моря (рис. 3) [26, 27].

Как видно из рис. 3, отложения баженовской свиты значительно обогащены Zn (в 9 раз), а также Fe, As, Sr, Cs, Eu, Ta, U (в 1,5–2 раза). Средние содержания близки для Sc, Cr, Co, Rb, Sb, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Au, Th. По сравнению с осадками Черного моря породы баженовской свиты обеднены Na и Ca.

Обращает на себя внимание чрезвычайно низкая концентрация брома в изученных отложениях (<0,9 г/т), что представляется удивительным для нефтематеринских образований. Данный геохимический феномен требует специального рассмотрения.

Авторами была сделана попытка выделить геохимические ассоциации элементов с помощью корреляционного анализа. При этом мы отдавали себе отчёт в том, что количество проб для этого недостаточно. Тем не менее, в силу качественной аналитики, была получена достаточно чёткая картина с выделением групп элементов, образующих естественные геохимические ассоциации (рис. 4). Корреляция между химическими элементами указывает на наличие двух чётких альтернативных геохимических ассоциаций: кластофильной – элементы, связанные с Th и Ta (обычные компоненты терригенной минеральной фракции), и органофильной – элементы, связанные с органическим веществом. Некоторые элементы, которые размещены между двумя ассоциациями, вероятно, зависят от обеих из них, а также от других факторов. Органофилы не обязательно подразумевают химическую связь между металлом и органическим веществом, а скорее только сосуществование металлов и органического вещества в осадках. Можно еще обратить внимание на поведение Ca и Sr, которые обособленно расположились на графике. Видимо, они соответствуют карбонатфильной группе В.М. Гавшина (1996), который, на основании генерализованных статистических оценок химических элементов в илах Чёрного моря, выделил три группы ассоциаций химических элементов: кластофильную, тяготеющую к глинистому веществу; органофильную, сопутствующую сапропелевому материалу, и карбонатфильную, соответствующую карбонатной группе.

Как мы видим, существование всех трёх выделенных В.М. Гавшиным групп химических элементов намечается и в отложениях баженовской свиты.

Полученные оценки содержаний 7 из 14 редкоземельных элементов близки к таковым, полученным ранее Ю.Н. Заниным и др. [3].

Отношение La/Th, рассматриваемое некоторыми исследователями как некоторая константа для

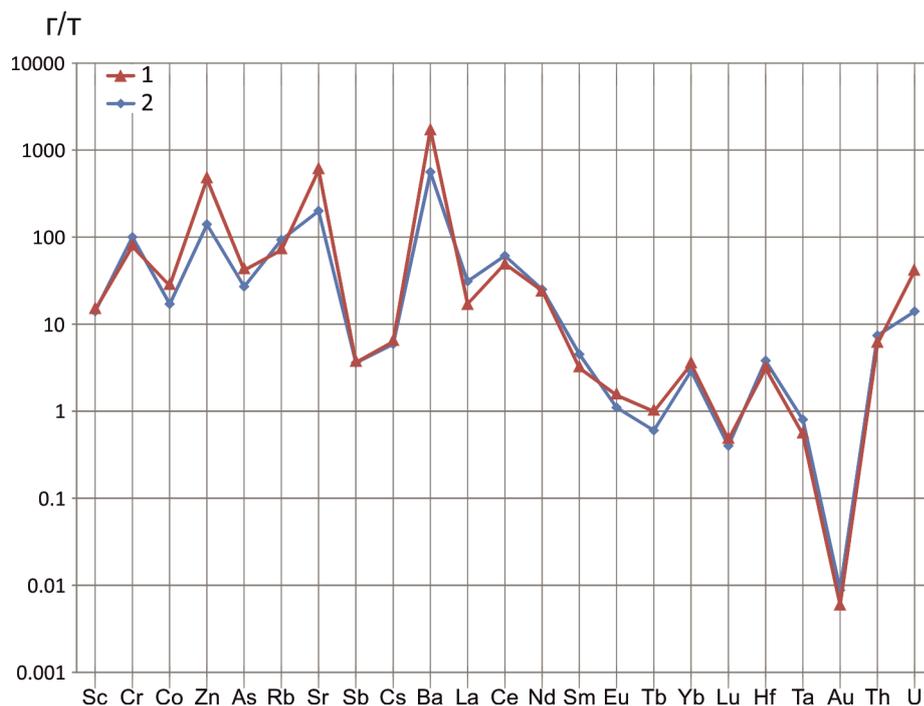


Рис. 2. Среднее содержание химических элементов в отложениях баженовской свиты (1) и в мировых черных сланцах (2) [25]

Fig. 2. Average content of chemical elements in deposits of the Bazhenov formation (1) and in black shale in the world (2) [25]

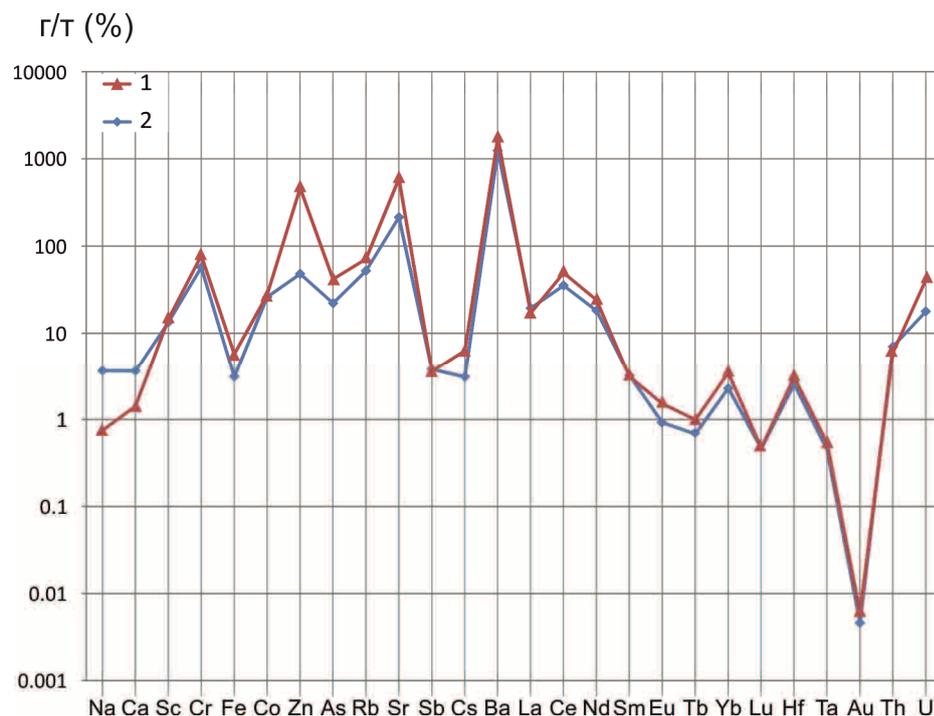


Рис. 3. Среднее содержание химических элементов в отложениях баженовской свиты (1) и в сапропелевых илах Черного моря (2) [26]

Fig. 3. Average content of chemical elements in deposits of the Bazhenov formation (1) and in sapropel of the Black Sea (2) [25]

морских осадочных отложений, принимаемая в среднем за 2,8 [24], в баженовских отложениях практически полностью соответствует таковому (La/Th=2,86), что еще раз подчеркивает проис-

хождение данных пород.

Битуминовые породы баженовской свиты в среднем содержат урана 41,2 г/т, при разбросе частных значений от 2,4 до 171 г/т, а тория – 6 г/т

в интервале значений 0,9–9,8 г/т, что согласуется с ранними оценками их содержания, выполненными И.И. Плуманом [5], В.М. Гавшиным [19], В.В. Хабаровым [6] и др.

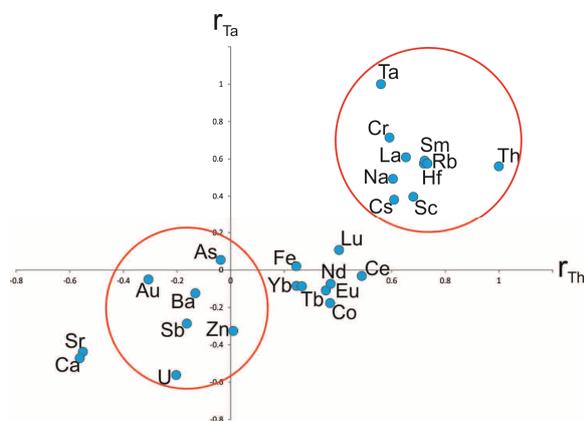


Рис. 4. Корреляция химических элементов с Ta и Th в изученных отложениях баженовской свиты

Fig. 4. Correlation of chemical elements with Ta and Th in the deposits of the Bazhenov formation

Выше среднего содержание урана установлено в основном на площадях: Северо-Калиновая, Герасимовская и Широкая, которые находятся в непосредственной близости друг к другу (рис. 1).

Практически во всех образцах радиоактивность имеет ярко выраженную урановую природу ($Th/U < 1$), за исключением трех проб, в которых содержание урана соответствует среднему содержанию в осадочных породах.

Содержание Th остается практически постоянным, изменяясь в небольших пределах. Видимо, торий содержится только в терригенной массе, тогда как для накопления урана необходимым условием являлось наличие органического углерода. Следует отметить, что во всех без исключения породах, разной степени литификации и метаморфизма, в том числе в современных илах, обогащенных органическим веществом сапропелевого типа, наблюдается положительная значимая корреляционная связь урана и органического углерода [5, 6, 10, 15–19, 25 и др.]. Каких-либо других значимых корреляционных связей урана с другими элементами, в том числе с редкоземельными, за исключением некоторой прямой положительной связи с Yb, установлено не было. Существование некоторой корреляционной связи U и Yb косвенно подтверждает вывод Ю.Н. Занина и др. [3] о том, что органическое вещество концентрирует Yb и Lu более активно, чем другие редкоземельные элементы.

Исследование особенностей распределения урана в породах баженовской свиты методом осколочной (f) радиографии показало, что распределение урана в породах крайне неравномерное. Высокие концентрации урана отчетливо приурочены к остаткам органического вещества, представленного радиоляриями и ихтиофауной (рис. 5). На вероят-

ность концентрации урана на остатках органических образований в баженовской свите обращали внимание И.И Плуман [5], Ю.В. Щепеткин и др. [28]. Иногда отмечается приуроченность урана к битуминозному веществу, наблюдаемому в виде тонких прожилков, иногда секущих слоистость, или отдельных изометричных образований.

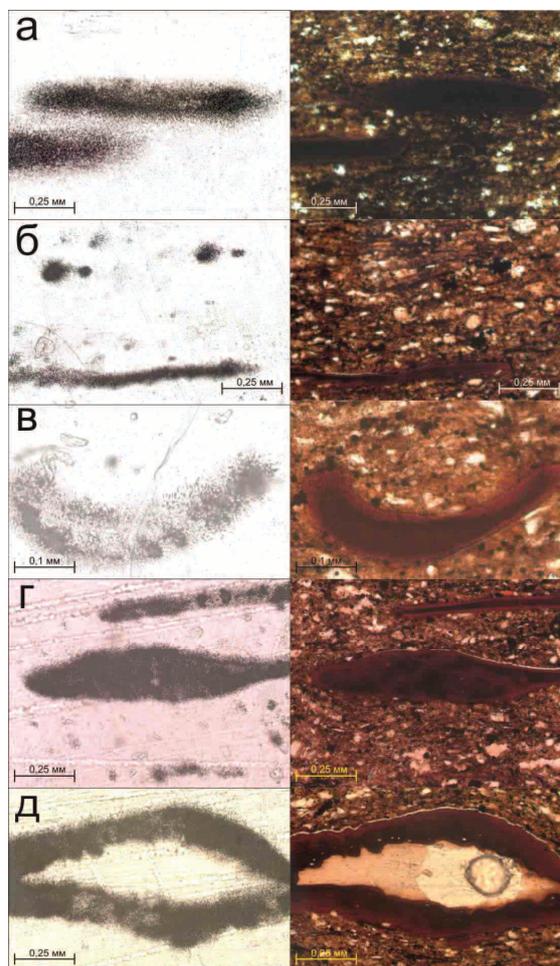


Рис. 5. Характерные особенности распределения урана в отложениях баженовской свиты по данным осколочной (f) радиографии. Снимки: слева осколочной радиографии, справа – участка породы, для которого сделана осколочная радиография. Николи параллельны

Fig. 5. Features of uranium distribution in the Bazhenov formation deposits by the data of fission radiography. Images of fission radiography are on the left; images of rock area are on the right. Fission radiography was made for this area. Nicols are parallel

Содержание урана в таких скоплениях составляет 0,0n–0, n %. Это предполагает нахождение на этих участках собственных минералов урана, что и было выявлено при исследовании на электронном микроскопе.

Минеральные агрегаты урана обнаруживаются в форме микровключений в кальциево-фосфатно-кремнистой массе с высоким содержанием углерода (рис. 6, табл. 2, 3).

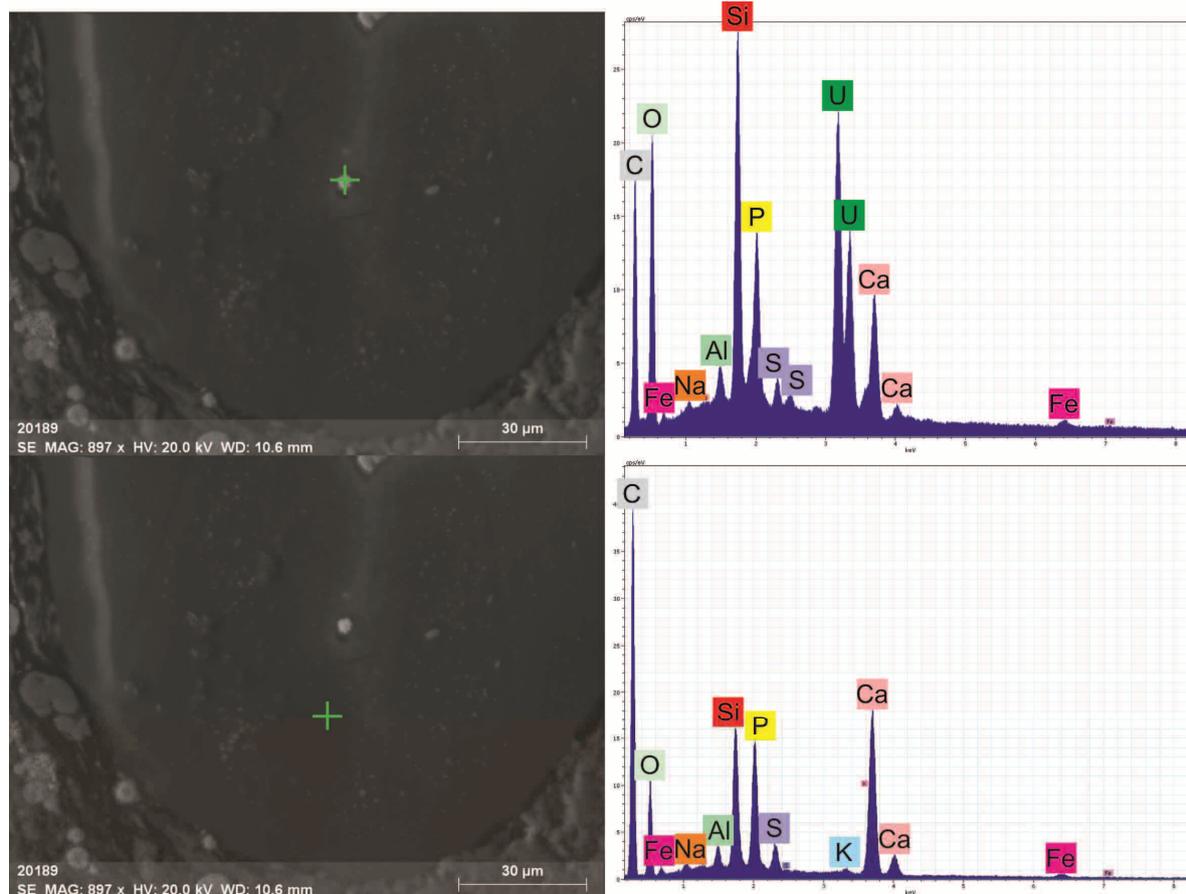


Рис. 6. Минеральная фаза урана (светлое) в матрице скрытокристаллической кремнисто-фосфатно-кальциевой массы с чрезвычайно высокой концентрацией углерода (>56 %). Здесь и далее на рисунке слева – электронно-микроскопический снимок, на котором показано точка исследования; справа – энергодисперсионный спектр в данной точке

Fig. 6. Mineral phase of uranium (light) in the matrix of cryptocrystalline siliceous-phosphate-calcium mass with extremely high carbon concentration (>56 %). Hereinafter: electron micrograph which shows the investigation point is on the left; energy-dispersive spectrum in this point is on the right

Таблица 2. Химический состав минеральной фазы урана (весовые проценты) (обр. СК-31-535)

Table 2. Chemical composition of mineral phase (wt. %) (sample CK-31-535)

Элемент/Element	Весовые проценты/Wt. %
Углерод*/Carbon*	12,8
Кислород/Oxygen	23,9
Натрий*/Sodium*	0,3
Магний*/Magnesium*	0,1
Алюминий*/Aluminum*	0,8
Кремний*/Silicon*	7,7
Фосфор*/Phosphorus*	4,4
Сера*/Sulfur*	0,3
Кальций*/Calcium*	6,9
Железо*/Iron*	0,9
Уран/Uranium	41,9
Сумма/Total	100

Примечание: здесь и далее жирным шрифтом выделены элементы, образующие собственные микроминеральные фазы. Звездочкой отмечены элементы матрицы.

Note: hereinafter the elements forming their own micro-mineral phases are highlighted in bold. Elements of the matrix are marked with an asterisk.

Таблица 3. Химический состав матрицы (весовые проценты) (обр. СК-31-535)

Table 3. Chemical composition of the matrix (wt. %) (sample CK-31-535)

Элемент/Element	Весовые проценты/Wt. %
Углерод/Carbon	56,9
Кислород/Oxygen	23,2
Натрий/Sodium	0,4
Магний/Magnesium	0,1
Алюминий/Aluminum	0,6
Кремний/Silicon	3,4
Фосфор/Phosphorus	4
Сера/Sulfur	0,8
Калий/Potassium	0,2
Кальций/Calcium	9,9
Железо/Iron	0,5
Сумма/Total	100

Иногда отмечаются оксиды урана в виде гроздевидных скоплений (рис. 7, табл. 4) и отдельных почковидных выделений в высокоуглеродистой кремниво-фосфатно-кальциевой скрытокристаллической массе, образующих чётко выдержанные слои мощностью 50–60 мкм.

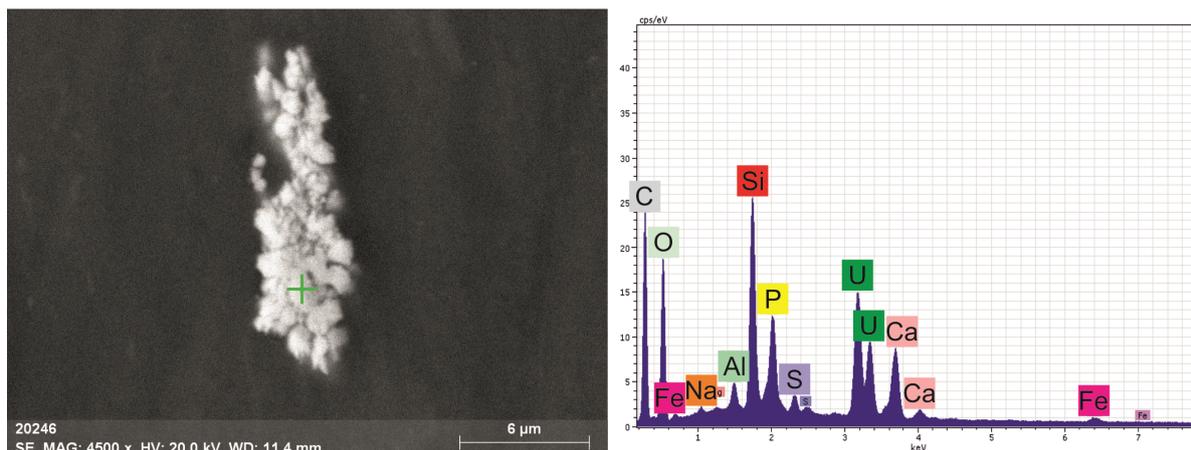


Рис. 7. Гроздевидный агрегат минеральной фазы урана (светлое) в кремнисто-фосфатно-кальциевой скрытокристаллической массе с чрезвычайно высокой концентрацией углерода (обр. СК-31–535)

Fig. 7. Botryoidal Aggregate of uranium mineral phase (light area) in siliceous-phosphate-calcium cryptocrystalline mass with extremely high carbon concentration (sample CK-31–535)

Таблица 4. Химический состав минеральной фазы урана (весовые проценты) (обр. СК-31–535)

Table 4. Chemical composition of uranium mineral phase (wt. %) (sample CK-31–535)

Элемент/Element	Весовые проценты/Wt. %
Углерод*/Carbon*	24,3
Кислород*/Oxygen*	25,1
Натрий*/Sodium*	0,8
Магний*/Magnesium*	0,4
Алюминий*/Aluminum*	1,4
Кремний*/Silicon*	7,7
Фосфор*/Phosphorus*	4,7
Сера*/Sulfur*	0,7
Кальций*/Calcium*	6,4
Железо*/Iron*	0,8
Уран*/Uranium	27,7
Сумма/Total	100

Минеральный состав отложений баженовской свиты сравнительно хорошо исследован при её литологических описаниях [1, 2].

Так, отмечается, что породы свиты при анализе их в керне, в шлифах и по химическому составу отчетливо подразделяются на четыре группы: низкоглинистые высококремнистые, высокоглинистые низкокремнистые, карбонаты, а также глинисто-алевритопесчаные породы аномальных разрезов [1, 2].

В составе «баженовита» на долю глинистых минералов приходится в среднем около 22 % всей терригенной составляющей, кварца около 42 %, карбонатов – 2–6 %, пирита – 7–8 %, апатита – 0,8 %. Планктоногенная компонента (по $C_{орг}$) составляет 11–12 % [1]. По данным И.И. Плумана [5], на тяжёлую фракцию минералов приходится от 0,5 до 25 % от общей массы породы. Из них 80–90 % приходится на аутигенный пирит. В следовых количествах отмечались акцессорные минералы типа рутила, лейкоксена, анатаза, турмалина, эпидота и циркона.

При исследовании на электронном микроскопе акцессорных минералов, формирующих тяжёлую фракцию, нами подтверждено присутствие пирита, оксидов

Ti с его средним содержанием в минералах около 34 %, обломочного циркона с хорошо сохранившимися формами кристаллов и не содержащего каких-либо примесей, в том числе Hf, в количествах более 0,1 %. Кроме того, из минералов-концентраторов редкоземельных элементов в породах обнаружен монацит ($CePO_4$) с примесью La и Th до 11,2 и 2,2 %, соответственно.

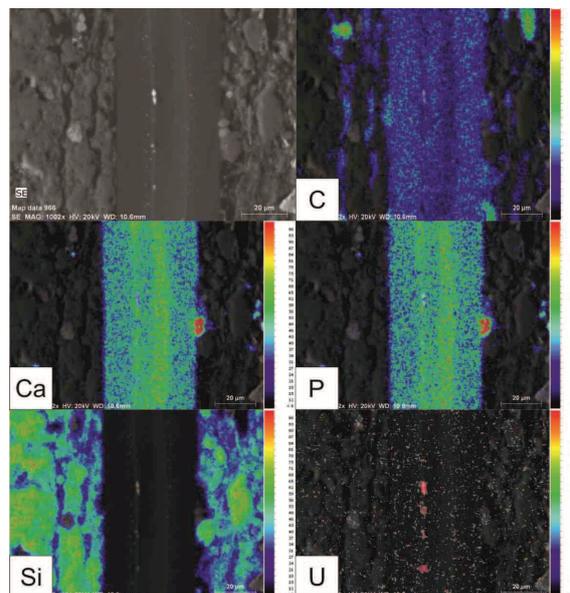


Рис. 8. Характер распределения C, Ca, P, Si, U по данным изучения на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, с энергодисперсионной приставкой Bruker в высокоуглеродистой кремниевом-фосфатно-кальциевой скрытокристаллической массе с тонкими микровкраплениями минерала урана, образующего чечевицеобразный микропрожилок. Образец СК-31–535, Северо-Калиновья площадь

Fig. 8. Way of C, Ca, P, Si, U distribution by the investigation data on scanning electron microscope Hitachi S-3400N with energy-dispersive adaptor Bruker with high-carbon siliceous-phosphate-calcium cryptocrystalline mass with thin contaminations of uranium mineral forming finch-shaped micro-vein. Sample CK-31–535, Severo-Kalinovaya area

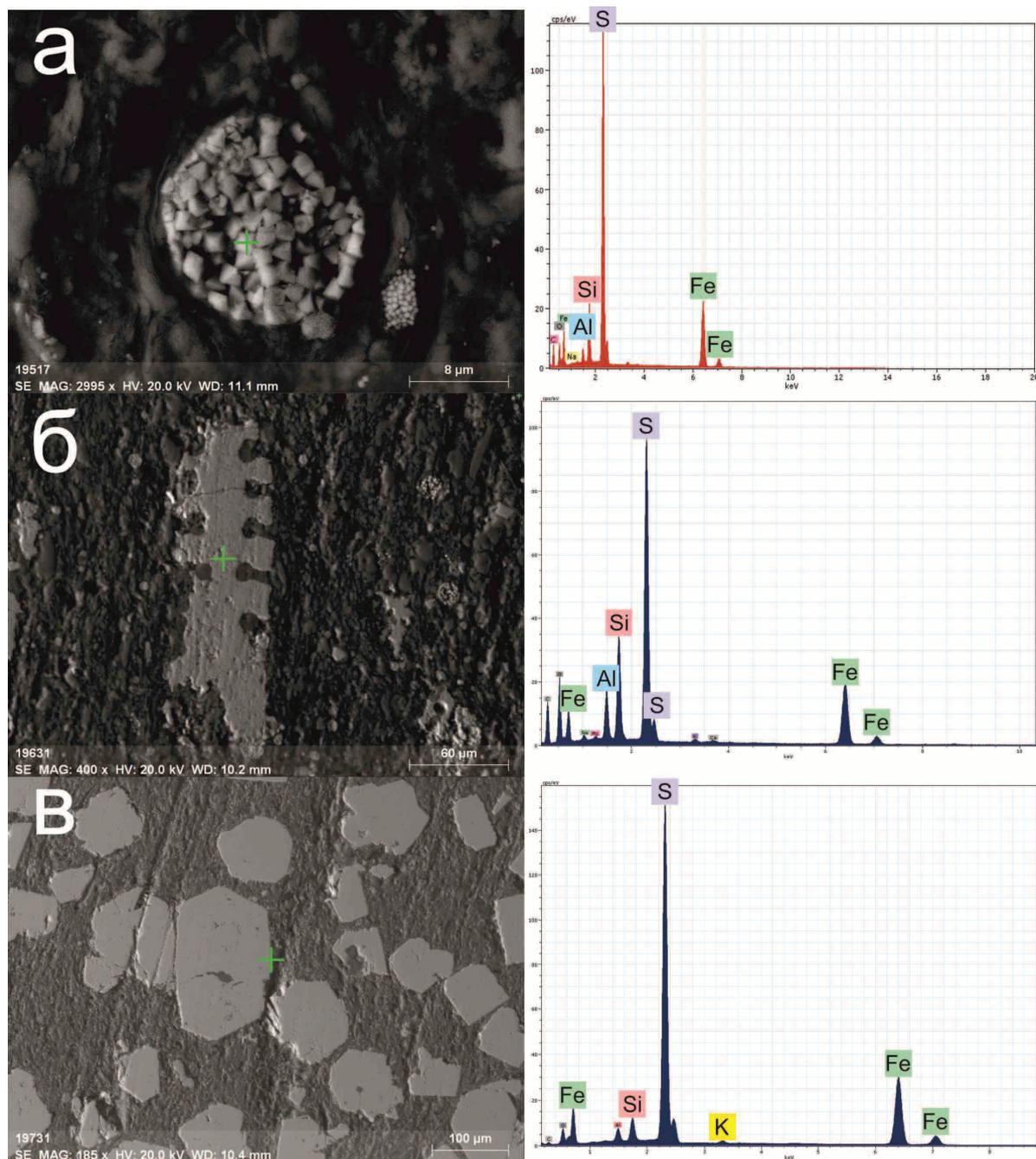


Рис. 9. Основные формы минеральных агрегатов сульфида железа (пирит-мельниковит) и их энергодисперсионный спектр

Fig. 9. Principle forms of mineral aggregates of sulfur sulfides (pyrite-melnicovite) and their energy-dispersive spectrum

Повсеместно обнаруживается *минеральные фазы железа*. Содержание железа по данным ИНАА в исследованных образцах находится в пределах от 1,4 до 32,4 % (сульфидные линзы) при среднем содержании в 5,8 %. Железо наблюдается в ассоциации с серой, скорее всего образуя собой сульфид железа, предположительно пирит-мельниковита (структура вещества не выяснялась). Минерал образует различные агрегаты: микроскопические шарики и стяжения, так называемый глобулярный пи-

рит, сформировавшийся как продукт жизнедеятельности бактерий (рис. 9, а); минеральные агрегаты, по всей вероятности, заместившие скелетные организмы (рис. 9, б), а также наблюдается в виде эвгдральных образований с ярко выраженной формой, соответствующей пириту (рис. 9, в, табл. 5).

В минеральном составе баженовских пород было выявлено обилие минеральных образований Ва с серой (рис. 10, табл. 6), что позволяет с высокой долей вероятности утверждать, что это барит.

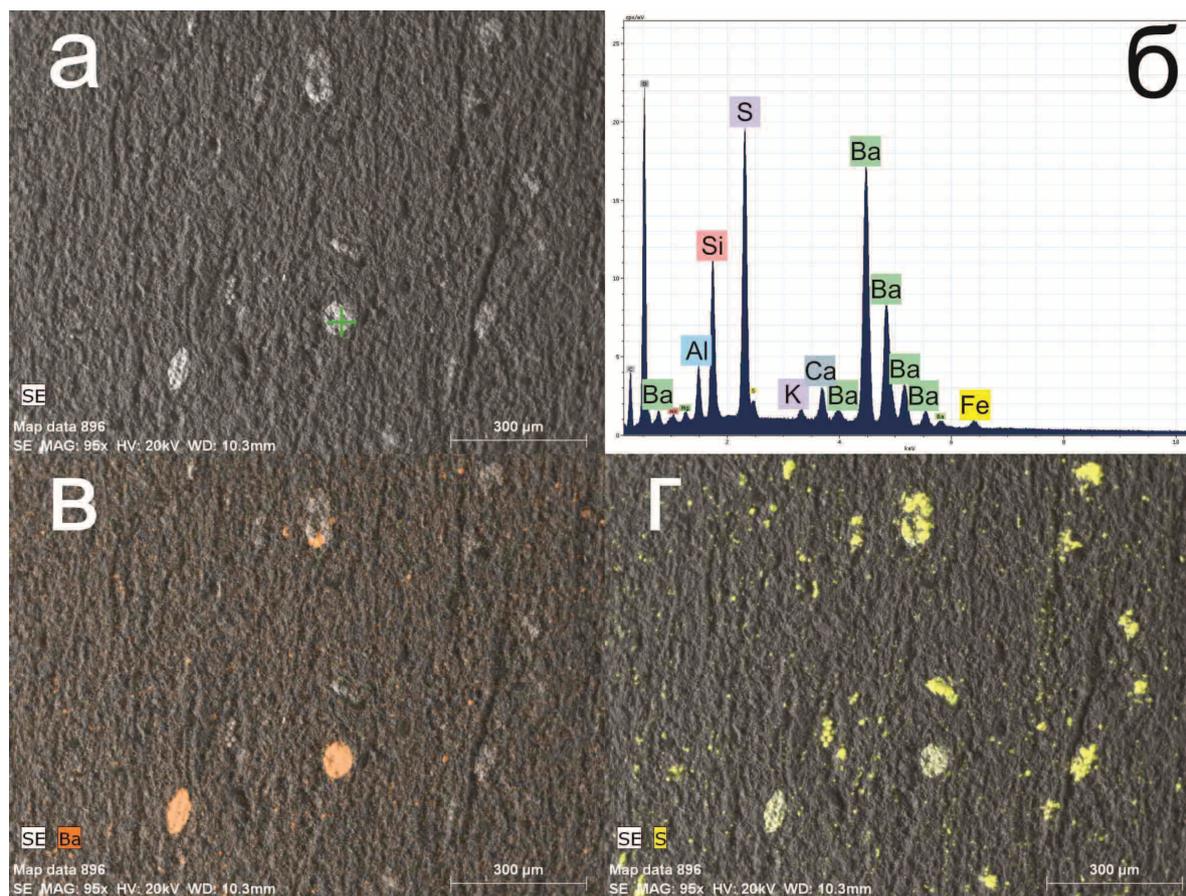


Рис. 10. Серосодержащая минеральная фаза бария: а) общий вид под электронным микроскопом; б) ее энерго-дисперсионный спектр в точке; в) характер распределения Ba в породе; г) характер распределения S в породе (обр. 413–2922.09)

Fig. 10. Sulfur-containing barium mineral phase: a) general view in electron microscope; б) its energy-dispersive spectrum in the point; в) way of Ba distribution in the rock; г) way of S distribution in the rock (sample 413–2922.09)

Таблица 5. Химический состав минеральной фазы эвгедральных кристаллов пирита (весовые проценты) (обр. BE-5976–28)

Table 5. Chemical composition of mineral phase of euhedral pyrite crystals (wt. %) (sample BE-5976–28)

Элемент/Element	Весовые проценты/Wt. %
Углерод*/Carbon*	5,3
Кислород*/Oxygen*	9,1
Алюминий*/Aluminum*	1,8
Кремний*/Silicon*	2,5
Сера/Sulfur	43,9
Калий*/Potassium*	0,4
Железо/Iron	37
Сумма/Total	100

Этому достаточно широко распространённому минералу в породах сопутствуют микроминеральные фазы Sr (рис. 11, табл. 7), присутствующие в соединении с кислородом и кальцием (вероятно стронцианит).

Минеральные фазы цинка в породах свиты встречаются постоянно, и они представлены разными по составу образованиями. Наиболее широко и постоянно наблюдаемой разновидностью является цинк-серосодержащая фаза, соответствующая сфалериту (рис. 12, табл. 8).

Таблица 6. Химический состав минеральной фазы бария (весовые проценты) (обр. 413–2922.09)

Table 6. Chemical composition of barium mineral phase (wt. %) (sample 413–2922.09)

Элемент/Element	Весовые проценты/Wt. %
Углерод*/Carbon*	8,1
Кислород*/Oxygen*	25,5
Натрий*/Sodium*	0,4
Магний*/Magnesium*	0,4
Алюминий*/Aluminum*	2,1
Кремний*/Silicon*	5
Сера/Sulfur	9,9
Калий*/Potassium*	0,4
Кальций*/Calcium	1,8
Железо*/Iron	0,9
Барий/Barium	45,5
Сумма/Total	100

Кроме того, Zn встречается в сложных соединениях с Cu, Sb, As, S или с Cu и S.

Кроме часто встречающихся минеральных образований, представленных выше, в породах баженовской свиты, также эпизодически обнаруживаются минеральные формы таких элементов, как: олово, свинец, медь, сурьма, мышьяк.

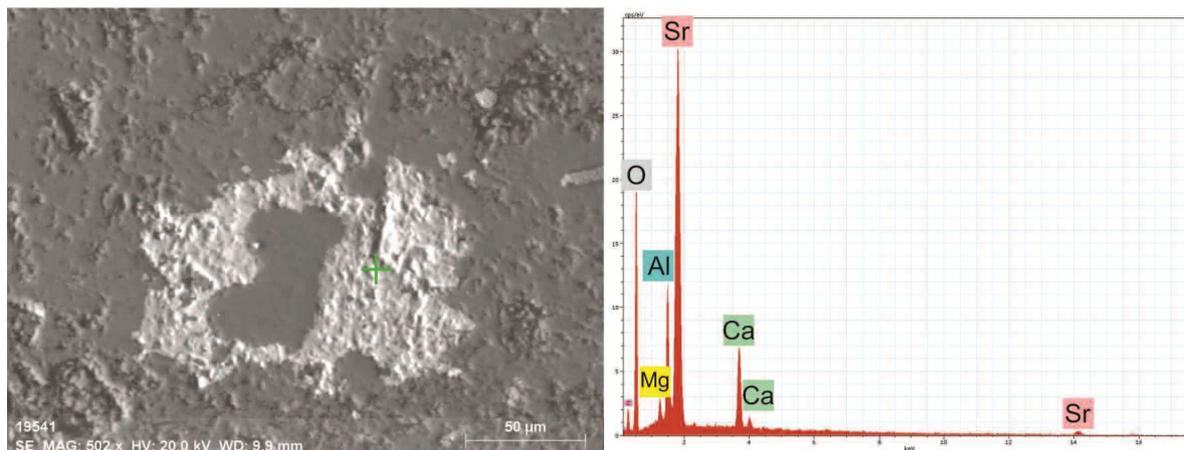


Рис. 11. Стронциевая минеральная фаза (светлое), имеющая ярко выраженный эпигенетический характер развития. Образец Ф-18
Fig. 11. Strontium mineral phase (light area) which has strongly pronounced epigenetic developmental character. Sample Ф-18

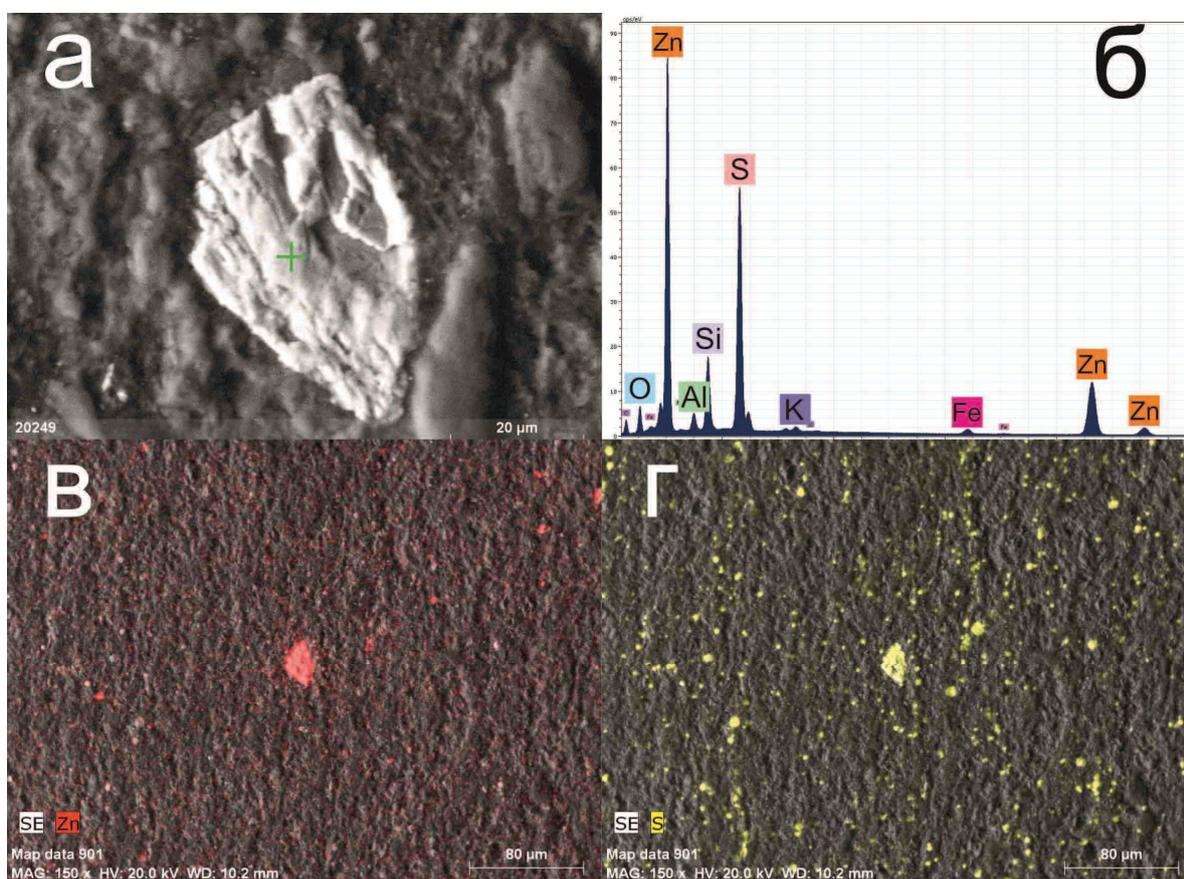


Рис. 12. Минеральная фаза цинка в терригенной массе образца Т-318-13: а) общий вид под электронным микроскопом; б) энерго-дисперсионный спектр в точке; в) характер распределения Zn в породе; г) характер распределения S в породе
Fig. 12. Zinc mineral phase in terrigene mass of the sample Т-318-13: а) general view in electron microscope; б) energy-dispersive spectrum in the point; в) way of Zn distribution in the rock; г) way of S distribution in the rock

Таким образом, высокие содержания ряда элементов, выявленные в результате нейтронно-активационного анализа, находят свое подтверждение при исследовании образцов пород под электронным микроскопом. Во многих случаях Fe, S,

Zn, Ba, Sr, As, Sb, U и редкоземельные элементы находятся в собственных минеральных формах.

В процессе исследования под электронным микроскопом образцов баженовской толщи не удалось обнаружить минеральных фаз Mo, Ni и V, хо-

ты их повышенные содержания в отложениях баженовской свиты отмечаются многими исследователями [29, 30]. По-видимому, эти элементы образуют органо-минеральные формы и их содержания в этих комплексах ниже предела выявления используемым методом (0,1 %).

Таблица 7. Химический состав минеральной фазы стронция (весовые проценты) (обр. Ф-18)

Table 7. Chemical composition of strontium mineral phase (wt. %) (sample Ф-18)

Элемент/Element	Весовые проценты/Wt. %
Углерод*/Carbon*	8,6
Кислород*/Oxygen*	46
Магний*/Magnesium*	0,9
Алюминий*/Aluminum*	4,5
Кальций/Calcium	5,7
Стронций/Strontium	34,3
Сумма/Total	100

Таблица 8. Химический состав минеральной фазы цинка (весовые проценты) (обр. Т-318–13)

Table 8. Chemical composition of zinc mineral phase (wt. %) (sample Т-318–13)

Элемент/Element	Весовые проценты/Wt. %
Углерод*/Carbon*	15
Кислород*/Oxygen*	9,5
Магний*/Magnesium*	0,3
Алюминий*/Aluminum*	1,9
Кремний*/Silicon*	5,8
Сера/Sulfur	22,7
Калий*/Potassium*	0,5
Железо/Iron	1,6
Цинк/Zinc	42,7
Сумма/Total	100

Заключение

С использованием современных ядерно-физических методов анализа вещества и электронной микроскопии выполнены исследования пород баженовской свиты Западной Сибири с целью выявления новых геохимических и минералогических особенностей баженовских отложений. Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- отложения баженовской свиты по своей геохимической специализации относятся к формации металлоносных черных сланцев. Ближайшим наиболее полным современным аналогом отложений баженовского свиты являются сапропелевые илы Черного моря;
- породы баженовской свиты по сравнению со средними данными для черных сланцев мира в 3 раза обогащены U, Zn, Sr, Ba и в 1,5 раза – As, Co и Tb;

- ряд элементов, U, Zn, Sr, Ba, As и другие, образуют геохимическую ассоциацию, тяготеющую к органическому веществу;
- содержания урана в породах колеблется от 2 до 171 г/т, при среднем его содержании в 40,9 г/т, что близко к ранее полученным оценкам. Исходя из современных геологических параметров распространения этих пород (мощность, площадь, объёмный вес пород) и генерализованных средних параметров содержания U, можно ориентировочно оценивать ресурсы этого металла на уровне 3 млрд т;
- уран в породах распределён крайне неравномерно. Главная его масса приурочена к планктонным органическим остаткам. Высокие концентрации урана приурочены к высокоуглеродистой кремниво-фосфатно-кальциевой скрытокристаллической массе, образующей нодулы и микропрослойки. В её пределах фиксируется собственная минеральная фаза урана, представленная, по всей вероятности, оксидом урана;
- высокие содержания ряда элементов, выявленные в результате нейтронно-активационного анализа, находят свое подтверждение при исследовании образцов пород под электронным микроскопом. Во многих случаях они (Fe, S, Zn, Ba, Sr, As, Sb, U и редкоземельные элементы) образуют собственные минеральные формы. Значительным распространением в породах пользуется сульфид железа (пирит-мельникит?), находящийся как минимум в трёх морфологических формах. Также широко распространены минеральные формы бария (барит?), стронция (стронцианит?) и цинка (сфалерит?) и др.
- первоочередным направлением дальнейших исследований рассматриваемых отложений следует считать минералого-геохимическое изучение отложений по системно отобраным образцам по площади и мощности развития баженовской свиты, с разделением их по типам пород, что позволит выявить латеральную и вертикальную закономерности изменения вещественных параметров данного уникального резервуара органического материала с комплексом сопутствующих элементов (U, V, Mo, РЗЭ, платиноиды и др.), что в конечном итоге позволит определиться с возможной моделью накопления урана и других элементов в этом геологическом образовании.

Авторы выражают благодарность д-ру геол.-минерал. наук, профессору Н.П. Запивалову за любезное предоставление информации по баженовской свите, д-ру геол.-минерал. наук, профессору И.В. Гончарову за высказанные ценные замечания и пожелания при просмотре рукописи статьи, д-ру геол.-минерал. наук, профессору Ю.Н. Занину за помощь в ознакомлении со статьями по данной проблеме, а также А.Ф. Судыко и Л.В. Богутской за высококачественное выполнение анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Некоторые аспекты формирования баженовской свиты в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера. – 2005. – № 4. – С. 118–135.
2. Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamirailova A.G. Composition and formation environments of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation (the central part of the West Siberian Basin) // Marine and Petroleum Geology. – 2008. – V. 25. – P. 289–306.
3. Редкоземельные элементы в баженовской свите Западно-Сибирского осадочного бассейна / Ю.Н. Занин, А.Г. Замирайлова, В.Г. Эдер, В.О. Красавчиков // Литосфера. – 2011. – № 6. – С. 38–54.
4. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia / Yu.N. Zanin, V.G. Eder, A.G. Zamirailova, V.O. Krasavchikov // Chemie der Erde – Geochemistry. – 2010. – V. 70. – № 4. – P. 363–376.
5. Плуман И.И. Ураноносность черных битуминозных аргиллитов верхней юры Западно-Сибирской плиты // Геохимия. – 1971. – № 11. – С. 1362–1368.
6. Уран, калий и торий в битуминозных породах баженовской свиты Западной Сибири / В.В. Хабаров, О.М. Нелепченко, Е.Н. Волков, О.В. Барташевич // Сов. геология. – 1980. – № 10. – С. 94–105.
7. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. – Л.: Наука, 1988. – 272 с.
8. Коробейников А.Ф. Особенности распределения золота в породах черносланцевой формации // Геохимия. – 1995. – № 12. – С. 1747–1757.
9. Schultz R.B., Coveney R.M. (Jr.), Time-dependent changes for Midcontinent Pennsylvania black shales, U.S.A // Chemical Geology. – 1992. – V. 99. – P. 83–100.
10. Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. – Л.: Недра, 1982. – 208 с.
11. Черников К.А., Запивалов Н.П. К вопросу о выделении нефтематеринских пород в разрезе мезо-кайнозой Западно-Сибирской низменности // Вестник Западно-Сибирского и Новосибирского геологических управлений. – 1958. – Вып. 2. – С. 12–24.
12. Вассоевич Н.Б. Исходное вещество для нефти и газа // Происхождение нефти и газа и формирование их месторождений. – М.: Недра, 1972. – С. 39–70.
13. Запивалов Н.П. Геохимическая характеристика нефтепроявлений в мезозое юго-восточной части Западно-Сибирской низменности // Вестник Западно-Сибирского и Новосибирского геологических управлений. – 1961. – Вып. 3. – С. 36–44.
14. Запивалов Н.П. Органическое вещество и битумы в юрских и валанжинских породах Назинской площади // Тр. СНИИГ-ГИМС. – 1961. – Вып. 14. – С. 59–73.
15. Плуман Н.И., Запивалов Н.П. Условия образования битуминозных аргиллитов волжского яруса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1977. – № 9. – С. 1138–1143.
16. Гавшин В.М., Бобров В.А. Закономерности распределения микроэлементов в баженовской свите // Доманикиты Сибири и их роль в нефтегазоносности. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1982. – С. 76–91.
17. Гавшин В.М., Гурари Ф.Г. Геохимия сланцевосных формаций Сибири // Геология угленосных и горючесланцевых формаций Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1987. – С. 50–56.
18. Геохимия морских терригенных отложений Западно-Сибирской плиты / В.М. Гавшин, В.А. Бобров, Р.Г. Демина, Л.М. Дорогиницкая, В.С. Пархоменко, Л.Н. Смертина // Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород. – М.: Наука. – 1983. – С. 48–56.
19. Gavshin V.M., Zakharov V.A. Geochemistry of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia // Econ. Geol. – 1996. – V. 91. – P. 122–133.
20. Баженовский горизонт Западной Сибири (Стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) / Ю.В. Брадучан, Ф.Г. Гольберт, Ф.Г. Гурари и др. – Новосибирск: Наука, 1986. – 217 с.
21. Филлина С.И., Корж М.В., Зонн М.С. Палеогеография и нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири. – М.: Наука, 1984. – 35 с.
22. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2002. – 253 с.
23. Флеров Г.Н., Берзина И.Г. Радиогрaфия минералов, горных пород и руд. – М.: Атомиздат, 1979. – 224 с.
24. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 379 с.
25. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimates of Clarkes of Carbonaceous biolithes: World averages for trace elements in black shales and coals // Intern. J. Coal. Geol. – 2009. – V. 78. – № 2. – P. 135–148.
26. Геохимия литогенеза в условиях сероводородного заражения / В.М. Гавшин, А.С. Лапухов, С.В. Сараев и др. – Новосибирск: Наука, 1988. – 129 с.
27. Батурич Г.Н. Геохимия сапропелей Черного моря // Геохимия. – 2011. – № 5. – С. 531–535.
28. Щепеткин Ю.В., Рыльков А.В. Формы нахождения и распределения урана в мезозойских толщах Западной Сибири // Тр. Зап.-Сиб. н.-и. геол.-развед. нефт. ин-т. – 1984. – № 195. – С. 118–120.
29. Гончаров И.В. Геохимия нефтей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 181 с.
30. Конторович А.Э., Занин Ю.Н., Меленевский В.Н., Замирайлова А.Г., Фомин А.Н., Давыдов Д.Ю. Твердые битумы баженовской свиты Западно-Сибирской плиты и главные особенности их геохимии // Геохимия. – 1999. – № 8. – С. 888–896.

Поступила 05.11.2014 г.

UDC 552.574:550.4 (571.1)

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THE BAZHENOV FORMATION, WEST SIBERIA, ACCORDING TO NUCLEAR-PHYSICS AND ELECTRON-MICROSCOPIC METHODS OF RESEARCH

Leonid P. Rikhvanov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Dmitry G. Usoltsev,

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

Sergey S. Ilenok,

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

Alexandra V. Ezhova,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: eav@tpu.ru

The research relevance consists in determining the demand in investigation of potential uranium-bearing black shales in the West Siberia, which, in its turn, would expand the existing Russian mineral resources.

The main aim of the study is to identify geochemical and mineralogical specialization of the Bazhenov formation, using modern research methods, and potential of the Bazhenov formation as a source of uranium.

The methods used in the study. Chemical composition was determined by instrumental neutron activation analysis, to clarify the composition of mineralization a scanning electron microscope HITACHI S-3400N was used; the spatial distribution of uranium mineralization was identified by the fragmentation (f) radiography method.

The results. The Bazhenov Formation contains U, Zn, Sr, Ba in 3 times more and As, Co, Tb in 1,5 times more than average black shales, these rocks contain as well less Au, Sm, La, Cr, Rb. The correlations between chemical elements shows two alternative geochemical associations: «clastophile» (Na, Sc, Cr, Rb, Cs, La, Sm, Hf) – elements related to Th and Ta (the usual components of terrigenous mineral fraction), and «organophile» (Zn, As, Sb, Ba, Au, U) – elements related to the organic matter. Br content in these rocks is very low. Gross content of U in bituminous rocks of the Bazhenov Formation is 41,2 ppm. Uranium distribution in the rocks is extremely unequal. High concentrations of uranium are clearly linked to the remnants of organic matter, represented by radiolarians and ichthyofauna. Mineral aggregates of U, represented by uranium oxides, are detected in the form of microinclusions in Ca-P-Si cryptocrystalline weight with high carbon content. A number of chemical elements Fe, S, Zn, Ba, Sr, As, Sb, U, and rare earth elements with higher concentrations, form their own mineral forms. Iron sulfide is extended greatly in the rocks. It has, at least, three morphological forms. Mineral forms of barium (barite?) and strontium (strontianite?) are widespread as well. Zinc is found in the form of zinc sulfide (sphalerite?) and in the form of intermetallic compounds with Cu, Sb, As. Sometimes there are minerals of rare earth elements, Sn and Pb. Own mineral forms of Mo, Ni and V are not identified, despite the fact that their content is high in the rocks.

Key words:

Western Siberia, Upper Jurassic – Lower Cretaceous, the Bazhenov Formation, black shales, uranium-bearing.

The authors give thanks to N.P. Zapivaylov, Dr. Sc., professor, for information on the Bazhenov formation, to I.V. Goncharov, Dr. Sc., professor, for precious corrections and requests to the authors of the paper, to Yu.N. Zanin, Dr. Sc., professor, for help in getting acquainted with the articles on this topic, as well as to A.F. Sudyko and L.V. Bogutskaya for high-quality analyses.

REFERENCES

1. Zanin Yu.N., Zamiraylova A.G., Eder V.G. Nekotorye aspekty formirovaniya bazhenovskoy svity v tsentralnykh rayonakh Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseyna [Some aspects of generation of the Bazhenov Formation in the central regions of the West Siberian sedimentary basin]. *Lithosphere*, 2005, no. 4, pp. 118–135.
2. Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamiraylova A.G. Composition and formation environments of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation (the central part of the West Siberian Basin). *Marine and Petroleum Geology*, 2008, vol. 25, pp. 289–306.
3. Zanin Yu.N., Zamiraylova A.G., Eder V.G., Krasavchikov V.O. Redkozemelnye elementy v bazhenovskoy svite Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseyna [Rare earth elements in the Bazhenov Formation of the West Siberian sedimentary basin]. *Lithosphere*, 2011, no. 6, pp. 38–54.
4. Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamiraylova A.G., Krasavchikov V.O. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2010, vol. 70, no. 4, pp. 363–376.
5. Pluman I.I. Uranonosnost chernykh bituminoznykh argillitov verkhney yury Zapadno-Sibirskoy plity [Uranium-bearing of black bituminous mudstone of the Upper Jurassic of the West Siberian Plate]. *Geochemistry International*, 1971, no. 11, pp. 1362–1368.
6. Khabarov V.V., Nelepchenko O.M., Volkov E.N., Bartashevich O.V. Uran, kaliy i toriy v bituminoznykh porodakh bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri [Uranium, potassium and thorium in the bituminous rocks of Bazhenov Formation of West Siberia]. *Sovetskaya geologiya*, 1980, no. 10, pp. 94–105.
7. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimiya chernykh slantsev* [Geochemistry of black shales]. Leningrad, Nauka Press, 1988. 272 p.

8. Korobeynikov A.F. Osobennosti raspredeleniya zolota v porodakh chernoslantsevoy formatsii [Features of gold distribution in rocks of black shale formation]. *Geochemistry International*, 1995, no. 12, pp. 1747–1757.
9. Schultz R.B., Coveney R.M. (Jr.), Time-dependent changes for Midcontinent Pennsylvania black shales, U.S.A. *Chemical Geology*, 1992, vol. 99, pp. 83–100.
10. Neruchev S.G. *Uran i zhizn v istorii Zemli* [Uranium and life in Earth's history]. Leningrad, Nauka Press, 1982. 208 p.
11. Chernikov K.A., Zapivalov N.P. K voprosu o vydelenii neftematernskikh porod v razreze mezo-kaynozoya Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [On the issue of selecting source rocks in a section of the Meso-Cenozoic deposits of West Siberian Lowland]. *Vestnik Zapadno-Sibirskogo i Novosibirskogo geologicheskikh upravleniy*, 1958, vol. 2, pp. 12–24.
12. Vassoevich N.B. Iskhodnoye veshchestvo dlya nefti i gaza [The starting material for oil and gas]. *Proiskhozhdeniye nefti i gaza i formirovaniye ikh mestorozhdeniy* [The origin of oil and gas and the formation of deposits]. Moscow, Nedra Press, 1972. pp. 39–70.
13. Zapivalov N.P. Geokhimicheskaya kharakteristika nefteproyavleniy v mezozoyskikh otlozheniyakh yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Geochemical characteristics of oil shows in the Mesozoic deposits of the south-eastern part of the West Siberian Lowland]. *Vestnik Zapadno-Sibirskogo i Novosibirskogo geologicheskikh upravleniy*, 1961, vol. 3, pp. 36–44.
14. Zapivalov N.P. Organicheskoye veshchestvo i bitumy v yurskikh i valanzhinskikh porodakh Nazinskoy ploshchadi [Organic matter and bitumen in the Jurassic and Valanginian rocks of Nazinskaya area]. *Trudy Sibirskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya*, 1961, vol. 14, pp. 59–73.
15. Pluman N.I., Zapivalov N.P. Usloviya obrazovaniya bituminoznykh argillitov volzhskogo yarusa Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii [Conditions of formation of bituminous shales of Volgian of West Siberian oil and gas province]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1977, no. 9, pp. 1138–1143.
16. Gavshin V.M., Bobrov V.A. Zakonomernosti raspredeleniya mikroelementov v bazhenovskoy svite [Patterns of distribution of trace elements in the Bazhenov Formation]. *Domanikity Sibiri i ikh rol v neftegazonosnosti* [Domanics of Siberia and their role in the oil and gas potential]. Novosibirsk, Sibirskiy nauchno-issledovatel'skiy institut geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya, 1982. pp. 76–91.
17. Gavshin V.M., Gurari F.G. Geokhimiya slantsenosnykh formatsiy Sibiri [Geochemistry of shale formations in Siberia]. *Geologiya uglenosnykh i goryuchslantsevykh formatsiy Sibiri* [Geology of coal and oil shale formations of Siberia]. Novosibirsk, Sibirskiy nauchno-issledovatel'skiy institut geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya, 1987. pp. 50–56.
18. Gavshin V.M., Bobrov V.A., Demin R.G., Doroginskaya L.M., Parkhomenko B.C., Smertina L.N. Geokhimiya morskikh terrigennykh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy plity [Geochemistry of marine clastic sediments of the West Siberian Plate]. *Geokhimiya platformennykh i geosinklinalnykh osadochnykh porod* [Geochemistry of platform and geosynclinal sedimentary rocks]. Moscow, Nauka Press, 1983. pp. 48–56.
19. Gavshin V.M., Zakharov V.A. Geochemistry of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia. *Econ. Geol.*, 1996, vol. 91, pp. 122–133.
20. Braduchan Yu.V., Golbert F.G., Gurari F.G. *Bazhenovskiy gorizont Zapadnoy Sibiri (Stratigrafiya, paleogeografiya, ekosistema, neftenosnost)* [Bazhenov horizon of West Siberia (stratigraphy, paleogeography, ecosystem, oil)]. Novosibirsk, Nauka Press, 1986. 217 p.
21. Filina S.I., Korzh M.V., Zonn M.S. *Paleogeografiya i neftenosnost bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri* [Paleogeography and oil-bearing of Bazhenov Formation of West Siberia]. Moscow, Nauka Press, 1984. 35 p.
22. Kontorovich V.A. Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoykskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri [Tectonics and petroleum potential of the Mesozoic and Cenozoic deposits in southeastern West Siberia]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Press, Branch «Geo», 2002. 253 p.
23. Flerov G.N., Berzina I.G. *Radiografiya mineralov, gornykh porod i rud* [Radiography of minerals, rocks and ores]. Moscow, Atomizdat, 1979. 224 p.
24. Taylor S.R., McLennan S.M. *Kontinentalnaya kora, ee sostav i evolyutsiya* [Continental crust, its composition and evolution]. Moscow, Mir, 1988. 379 p.
25. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimates of Clarkes of Carbonaceous biolithes: World averages for trace elements in black shales and coals. *Intern. J. Coal. Geol.*, 2009, vol. 78, no. 2, pp. 135–148.
26. Gavshin V.M., Lapukhov A.S., Saraev S.V. *Geokhimiya litogeneza v usloviyakh serovodorodnogo zarazheniya* [Geochemistry of lithogenesis under hydrogen sulphide contamination]. Novosibirsk, Nauka Press, 1988. 129 p.
27. Baturin G.N. Geokhimiya sapropely Chernogo morya [Geochemistry of the Black Sea sapropel]. *Geochemistry International*, 2011, no. 5, pp. 531–535.
28. Shechetkin Yu.V., Rylkov A.V. Formy nakhozheniya i raspredeleniya urana v mezozoyskikh tolshchakh Zapadnoy Sibiri [Forms of occurrence and distribution of uranium in the Mesozoic strata of Western Siberia]. *Trudy Zapadno-Sibirskogo nauchno-issledovatel'skogo geologorazvedochnogo neftyanogo institute*, 1984, no. 195, pp. 118–120.
29. Goncharov I.V. *Geokhimiya neftey Zapadnoy Sibiri* [Geochemistry of oil in West Siberia]. Moscow, Nedra Press, 1987. 181 p.
30. Kontorovich A.E., Zanin Yu.N., Melenevskii V.N., Zamiraylova A.G., Fomin A.N., Davydov D.Y. Tverdye bitumy bazhenovskoy svity Zapadno-Sibirskoy plity i glavnye osobennosti ikh geokhimi [Solid bitumen of Bazhenov Formation of West Siberian plate and the main features of their geochemistry]. *Geochemistry International*, 1999, no. 8, pp. 888–896.

Received: 5 November 2014.

УДК 556.06:551.482.212

СВЯЗИ МЕЖДУ МИКРОЭЛЕМЕНТНЫМ СОСТАВОМ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПРОЦЕССАМИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ МЕКОНГ (ВЬЕТНАМ)

Савичев Олег Геннадьевич,

д-р географ. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: OSavichev@mail.ru

Фунг Тхай Зьонг,

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: phungthaiduongdhdtd@gmail.com

Актуальность работы. Исследование механизмов формирования природных и природно-антропогенных геохимических аномалий в водных объектах играет исключительно важную роль в геологии и геоэкологии, является необходимым этапом разработки долгосрочных прогнозов состояния водных и наземных экосистем и планирования природоохранных мероприятий. На примере Меконга – крупнейшей реки Индокитая – рассмотрен один из ключевых аспектов этой проблемы – выявление связей между геохимическими и гидрологическими процессами в дельте большой реки. Выбор объекта обусловлен значением реки в социально-экономическом развитии юго-восточной Азии.

Цель работы: выявление связей между процессами формирования донных отложений в дельте реки Меконг (Вьетнам) и их микроэлементного состава.

Методы исследования: ландшафтно-геохимический и географо-гидрологический методы, математическое моделирование гидрологических процессов.

Результаты и выводы. Получены данные о микроэлементном составе донных отложений в дельте реки Меконг. Выполнена оценка деформаций русла реки Меконг (рукав Хамлуонг) с использованием метода А.В. Караушева по данным промерных работ в 1999 и 2000 гг. в створах, расположенных в 72, 49, 14, 1 км от морского края дельты. Установлено, что аккумуляция наносов преобладает на участке рукава Хамлуонг, 0–31 км от морского края дельты. На основе данных геохимического опробования, проведенного Фунг Тхай Зьонгом в 2013–2014 гг., показано, что, во-первых, в пределах этого участка ежегодно оседает, т/год: Zn – 1244; Cu – 443; Pb – 63; Cd – 18; As – 96; Hg – 1,7. Во-вторых, в дельте Меконга основная часть массы Zn, Cu, Pb, Cd, 73 % массы As и 69 % массы Hg формируется за счёт осаждения частиц наносов, с которыми (во взвешенной форме) переносятся указанные микроэлементы. 27 % массы As и 31 % массы Hg связано с сорбцией на осаждающихся частицах и выведением из раствора малорастворимых соединений. Сделан вывод о том, что для сельскохозяйственного использования наиболее оптимально применение донных отложений, изъятых в дельте Меконга на участке от 31 до 15 км. Донные отложения на участке 0–15 км с наиболее высокими концентрациями токсичных микроэлементов целесообразно использовать для строительных нужд при инженерной защите прибрежных территорий.

Ключевые слова:

Дельта Меконга, Вьетнам, донные отложения, микроэлементный состав, русловые деформации.

Введение

Река Меконг – одна из крупнейших рек мира и главная водная артерия Индокитая. Состояние Меконга в значительной степени определяет социально-экономическую ситуацию в этом регионе, что обуславливает актуальность исследований процессов его формирования, в том числе процессов формирования донных отложений и их химического состава. Особенно важное значение такие исследования приобретают в дельте Меконга, где коммунальное и сельское хозяйство в существенной мере зависит от того, где, как, в каком количестве и с каким составом происходит формирование или размыв донных отложений.

Указанные вопросы рассматриваются в рамках функционирования системы управления водными ресурсами Социалистической республики Вьетнам [1–6] и международной комиссии по реке Меконг [7–11], а также в работах ряда исследователей

[12–15]. Благодаря этому в настоящее время имеется выстроенная система режимных гидрологических наблюдений, выполнено обоснование ряда крупных водохозяйственных проектов. Тем не менее, непосредственно в дельте рассматриваемой реки геохимическую изученность донных отложений по состоянию на 2011–2014 гг. пока нельзя признать удовлетворительной, что определило общее направление исследования, выполненного авторами в Томском политехническом университете (ТПУ) и университете Донгтхап (г. Цаолянь, Социалистическая республика Вьетнам) в 2012–2014 гг.

В данной работе рассмотрены результаты одного из этапов этого исследования, направленного на выявление связей процессов формирования донных отложений в дельте Меконга и их микроэлементного состава, информация о которых является основой для: 1) принятия управленческих решений в области использования и охраны рассматривае-

мого водного объекта; 2) разработки теории формирования природных и природно-антропогенных геохимических аномалий в водных объектах.

Объект и методика исследования

Район исследований схематично показан на рис. 1. Дельта Меконга площадью 46700 км² [12] имеет сложное строение и представлена двумя комплексами рукавов – Тиензанг и Хаузанг. Комплекс Хаузанг включает три крупных рукава, а Тиензанг – шесть, среди которых наибольший по водности – рукав Хамлуонг. В качестве основного объекта исследования выбран крупный рукав Хамлуонг, по которому, согласно [5], проходит примерно 16 % общего стока Меконга.

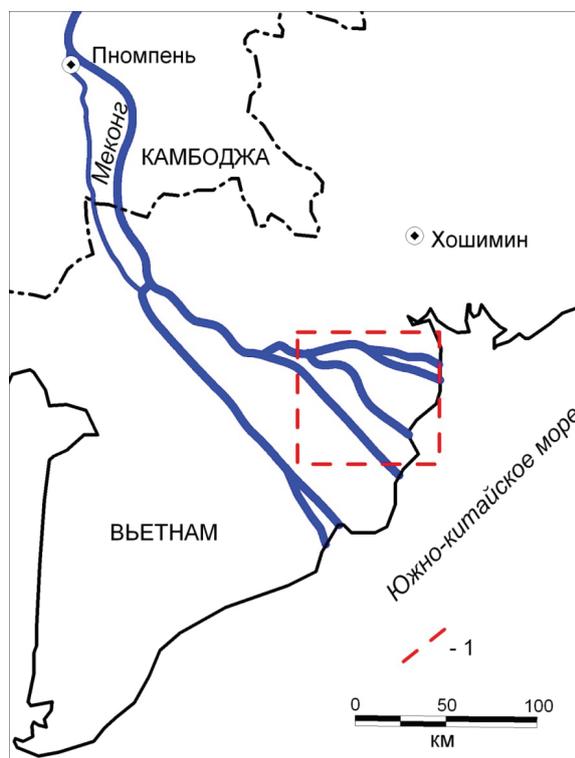


Рис. 1. Схема расположения района исследований (1) в дельте реки Меконг

Fig. 1. Plan of the research area (1) in the delta of the Mekong river

Методика исследований включала в себя: 1) полевые работы по отбору проб донных отложений и воды в рукавах Хамлуонг, Кочьен, Кыадай и проток; 2) лабораторные работы по определению химического состава проб донных отложений и воды; 3) гидравлические расчёты процессов осаднения/размыва донных отложений. Задача первых двух этапов – получение общей характеристики химического состава донных отложений и поверхностных вод, задача третьего этапа – оценка общего направления процессов формирования донных отложений.

Отбор проб выполнен в январе 2013 и 2014 гг. Фунг Тхай Зыонгом и сотрудниками университета

Донгтхап (г. Цаолань, Социалистическая республика Вьетнам), в том числе: 1) в январе 2013 г. было отобрано по 12 проб донных отложений и воды в рукаве Хамлуонг на участке 0–75 км от морского края дельты, по 2 пробы из рукавов Кыадай и Кочьен (в верхней и нижней части), 4 пробы из протока; 2) в январе 2014 г. – по 3 пробы донных отложений и воды из рукава Хамлуонг в верхней, средней и нижней частях. Отбор донных отложений проводился из верхнего слоя около 0,2 м в 10–50 м от берега в рукавах и в 5–10 м от берега в протоках, отбор проб вод – из слоя 0,3–0,4 м от поверхности. Пробы донных отложений высушивались при температуре 25 °С и измельчались до фракции с диаметром частиц до 0,5 мм, пробы воды фильтровались с помощью бумажного фильтра с диаметром пор 1,5 мкм.

Лабораторные работы в 2013 г. выполнялись в лаборатории университета Донгтхап, в 2014 г. – в университете Донгтхап и гидрохимической лаборатории ТПУ (номер государственной аккредитации № РОСС RU. 0001.511901 от 12.07.2011 г.). В донных отложениях проводилось определение: в водной вытяжке – значений удельной электропроводности (УЭП, кондуктометрия) и pH (потенциометрия), концентраций NH₄⁺ и NO₃⁻ (ионная хроматография); в кислотной вытяжке – концентраций Zn, Cu, Pb, Cd, As, Hg (атомно-абсорбционный метод). Аналогичными методами определялись соответствующие показатели поверхностных вод. Кроме того, в 2014 г. выполнено определение в поверхностных водах и водной вытяжке из проб донных отложений SO₄²⁻ (турбидиметрический метод), Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, бихроматной (БО) и перманганатной (ПО) окисляемости (титриметрический метод), Si (фотометрический метод), в кислотной вытяжке из донных отложений – Hg, As, Zn, Pb, Cu, Cd, Mn, Al, Na⁺, K⁺ (атомно-абсорбционный, инверсионно-вольтамперометрический, пламенно-эмиссионная спектрометрия).

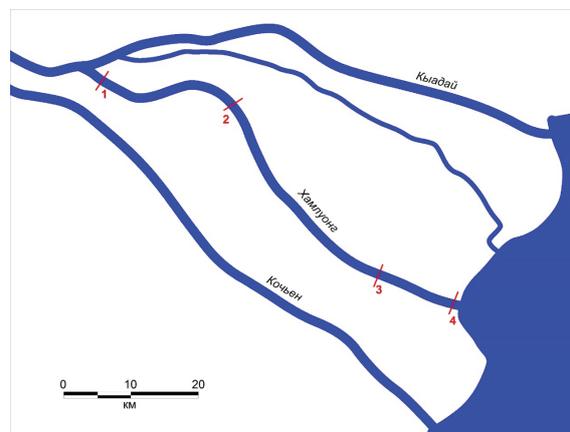


Рис. 2. Схема расположения расчётных створов на рукаве Хамлуонг

Fig. 2. Diagram of control points location on the Hamluong channel

В качестве исходной информации принято: а) расходы воды, м³/с: в среднем за год – 1890, в январе – 1168, в феврале – 681, в марте – 465, в апреле – 360, в мае – 478, в июне – 1330, в июле – 2104, в августе – 3137, в сентябре – 3918, в октябре – 3978, в ноябре – 3075, в декабре – 1986 [2]; б) уклон водной поверхности 0,008 м/км [3]; в) профили поперечного сечения рукава Хамлуонг (рис. 2) в сечении № 1 и 2 в 2000 г., а в сечении № 3, 4 в 1999 и 2000 гг. [4]; в) средний диаметр взвешенных наносов принят в размере 0,006 мм [5].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ собственных материалов и данных, полученных другими авторами [1, 4, 5], позволил получить обобщённую характеристику химического состава поверхностных вод и донных отложений в дельте Меконга на участке 4–77 км от её морского края за период с 2010 по 2014 гг. (табл. 1, 2). В верхнем звене этого участка поверхностные воды в целом пресные, гидрокарбонатные кальциевые, вблизи моря (до 10 км) солоноватые, хлорид-

ные кальциевые. На всём протяжении участка воды обычно нейтральные и слабощелочные, содержат значительное количество нитратов и ионов аммония, соответствующее, согласно [7], категориям «очень плохие» («very bad») и «плохие» («bad»). Превышение российских нормативов качества воды наблюдается также по содержанию Hg, Cu, Zn, Mn, Al, Fe, Si, NH₄⁺, NO₃⁻, органических веществ по биохимическому потреблению кислорода (БПК₅) за 5 суток, превышение нормативов, установленных в республике Вьетнам [16], по содержанию соединений азота (табл. 1).

Для донных отложений нормативы качества установлены во Вьетнаме [17], но отсутствуют в Российской Федерации. С учётом того, что почвенный покров в дельте Меконга формируется под влиянием процессов осаждения речных наносов, нельзя не отметить повышенные концентрации Cu и Cd (табл. 1). Общая закономерность в распределении концентраций тяжёлых металлов в донных отложениях заключается в определённом их увеличении по мере приближения к морскому краю дельты (рис. 3).

Таблица 1. Средний химический состав поверхностных вод в дельте р. Меконг (4–77 км от морского края дельты)

Table 1. Average chemical composition of the surface waters in the delta of the Mekong river (4–77 km from the delta sea edge)

Показатель Index	Рукава и протоки Channels		Рукав Хамлуонг Hamluong channel		Протоки Channels		Норматив качества воды во Вьетнаме [16] Water quality standard in Vietnam [16]
	A	δ _A	A	δ _A	A	δ _A	
pH, ед. pH	7,55	0,11	7,58	0,11	7,47	0,32	6,5–8,5
мг/дм ³ (от Ca ²⁺ до Hg) /mg/dm ³ (from Ca ²⁺ too Hg)							
Ca ²⁺	34,3	5,0	22,4	5,5	43,5	7,3	–
Mg ²⁺	29,2	6,0	22,1	15,0	37,2	6,8	–
Na ⁺	89,3	73,8	154,3	139,6	19,6	2,2	–
K ⁺	6,3	4,3	9,6	8,2	2,8	0,5	–
HCO ₃ ⁻	63,9	59,1	63,9	59,1	–	–	–
Cl ⁻	103,2	66,5	166,3	110,8	–	–	–
SO ₄ ²⁻	154,7	42,6	91,0	46,7	131,5	27,6	–
NO ₃ ⁻	25,940	2,837	27,815	3,916	19,423	3,775	5,0
NO ₂ ⁻	0,029	0,007	0,020	0,008	–	–	0,02
NH ₄ ⁺	4,591	0,675	4,675	0,979	4,763	1,660	1,0
PO ₄ ⁻	0,049	0,005	0,047	0,010	–	–	–
Si	4,658	0,429	5,224	0,792	–	–	–
Fe	1,549	0,161	1,736	0,273	–	–	–
Al	0,120	0,039	0,217	0,081	–	–	–
Mn	0,022	0,007	0,022	0,007	–	–	–
Zn	0,3530	0,0128	0,3433	0,0166	0,4014	0,0220	1,0
Cu	0,0605	0,0051	0,0564	0,0074	0,0736	0,0073	0,2
Pb	0,0005	0,0003	0,0007	0,0004	<0,0001	<0,0001	0,02
Cd	0,0002	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,005
As	0,0004	<0,0001	0,0004	<0,0001	0,0004	<0,0001	0,02
Hg	0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001
ХПК, мгО/дм ³ COD, mgO/dm ³	7,003	1,748	8,185	3,464	–	–	–
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ BOD, mgO/dm ³	2,302	0,127	2,165	0,119	–	–	–

Примечание: А – среднее арифметическое; δ_A – погрешность определения среднего арифметического; приведены результаты обобщения материалов [1, 4, 6] и данных, полученных авторами в 2011–2014 гг.

Note: A is the arithmetic mean; δ_A is the error of determining the arithmetic mean. The table introduces the results of generalizing materials of [1, 4, 6] and data obtained by the authors in 2011–2014.

Таблица 2. Средний химический состав донных отложений и водных вытяжек из донных отложений в дельте р. Меконг (4–77 км от морского края дельты)

Table 2. Average chemical composition of the bed load sediments in the delta of the Mekong river (4–77 km from the delta sea edge)

Показатель Index	Рукава и протоки Channels		Рукав Хамлуонг Hamluong channel		Протоки Channels		Норматив качества донных отложений во Вьетнаме [17] Water quality standard of bed load sediments in Vietnam [17]
	A	δ_A	A	δ_A	A	δ_A	
pH*, ед. pH	7,29	0,11	7,42	0,10	6,79	0,21	–
мг/кг (от Ca ²⁺ до Hg)/mg/dm ³ (from Ca ²⁺ to Hg)							
Ca ²⁺ *	–	–	102,3	12,4	–	–	–
Mg ²⁺ *	–	–	96,0	41,2	–	–	–
Na ⁺ *	–	–	761,8	675,9	–	–	–
K ⁺ *	–	–	58,0	35,7	–	–	–
HCO ₃ ⁻ *	–	–	207,3	42,8	–	–	–
Cl ⁻ *	–	–	1024,6	980,2	–	–	–
SO ₄ ²⁻ *	–	–	584,8	193,7	–	–	–
NO ₃ ⁻ *	31,611	1,986	31,832	2,802	28,386	1,932	–
NH ₄ ⁺ *	47,268	2,694	48,809	4,174	37,606	2,896	–
Si*	–	–	118,667	9,945	–	–	–
Fe	–	–	32403,3	1872,5	–	–	–
Al	–	–	38393,3	6226,6	–	–	–
Mn	–	–	713,933	30,346	–	–	–
Zn	94,797	2,406	92,547	3,386	98,985	3,110	124
Cu	31,306	1,234	30,404	1,836	33,888	0,571	18,7
Pb	6,228	1,415	7,668	2,067	3,461	1,006	30,2
Cd	0,969	0,147	0,966	0,202	0,785	0,195	0,7
As	5,153	0,506	5,170	0,742	4,625	0,556	7,24
Hg	0,100	0,006	0,107	0,008	0,072	0,010	0,13
ПО*, мгО/дм ³ Permanganate oxidation, mgO/dm ³	–	–	19,667	5,397	–	–	–

Примечание: * – результаты анализа водной вытяжки.

Note: * – the results of water extract analysis.

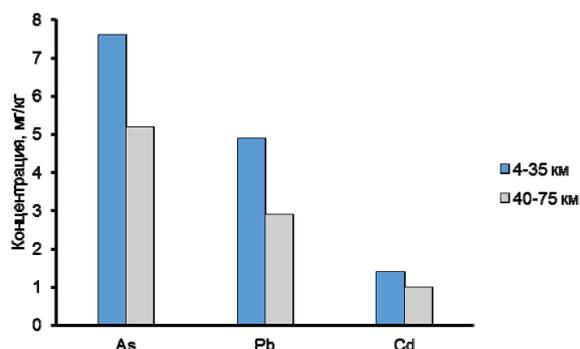


Рис. 3. Средние концентрации As, Pb и Cd в донных отложениях рукава Хамлуонг на участках 4–35 и 40–75 км в январе 2013 г. (на каждом участке по 6 проб)

Fig. 3. Average concentrations of As, Pb and Cd in bed load sediments of the Hamluong channel on the sites of 4–35 and 40–75 km in 2013 January (6 samples on each site)

Можно предположить, что это снижение так или иначе связано с русловыми процессами и твёрдым стоком. Однако методология подобных исследований в настоящее время не разработана. По этой причине и с учётом имеющихся гидрологических и геохимических данных предложены и апробированы следующие алгоритмы: 1) выявления

связей между процессами формирования донных отложений и их составом; 2) оценки аккумуляции микроэлементов в донных отложениях.

1. Прежде всего, необходимо определить масштабы аккумуляции или размыва донных отложений. Для решения этой задачи нами использован метод А.В. Караушева [18], основанный на использовании упрощённого одномерного уравнения транспорта наносов в размываемом русле при условии незначительности изменения расхода влеко- мых наносов по длине реки в среднем для всего сечения потока:

$$\Delta h_b = \frac{G_s \Delta t}{1 - \lambda}, \quad (1)$$

$$G_s = (u + k)S - kS_{ss}, \quad (2)$$

$$S_{ss} = 150 N_Y \eta^2 \frac{v_a^2}{h_a}, \quad (3)$$

$$N_Y = \frac{M_Y C_Y}{g}, \quad (4)$$

$$M_Y = \begin{cases} 0,7C_Y + 6, & 10 \leq C_H \leq 60 \\ 48, & C_Y > 60 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\eta^2 = \frac{0,53C_Y - 4,1}{C_Y - 2}, \quad (6)$$

$$C_Y = \frac{h_a^{\frac{1}{6}}}{n_M}, \quad (7)$$

$$v_a = C_Y \sqrt{Jh_a}, \quad (8)$$

$$k = \frac{u\Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (9)$$

где h_b – толщина донных отложений; Δh_b – изменение высотной отметки дна; G_s – вертикальная составляющая расхода наносов с поверхности дна, рассчитываемая по формуле (2); λ – пористость грунта; Δt – расчётный временной интервал; S – содержание взвешенных наносов (мутность потока); S_{ss} – мутность взмыва, определяемая по формулам (3)–(6); u – средняя гидравлическая крупность частиц диаметром D_{as} ; k – коэффициент пропорциональности, связанный с гидромеханическим параметром наносов Γ формулой (9); h_a – средняя глубина потока; C_Y – коэффициент Шези в формуле (7); n_M – коэффициент шероховатости.

Коэффициенты шероховатости n_M определялись обратным расчётом по формулам Маннинга и Шези (7, 8) при расходе воды 3978 м³/с для каждого профиля: № 1 – 0,0104; № 2 – 0,0169; № 3 – 0,0507; № 4 – 0,0469. Средние глубины и скорости течения в рукаве Хамлуонг вычислялись по зависимостям от расхода воды, полученным для каждого профиля. Средняя мутность ориентировочно принята (при условии среднегодового значения 170 г/м³ [12]) равной транспортирующей способности потока S_{tr} по формуле (10), предложенной А.В. Караушевым [18].

$$S_{tr} = \Gamma S_{ss}. \quad (10)$$

В расчётные значения Δh_b , вычисленные по формуле (1), вводились поправки с учётом измеренных в течение 1999–2000 гг. деформаций русла: в створе № 3 – 0,118 м/год; в створе № 4 – 0,200 м/год. Погрешность определения вертикальных деформаций рассчитана согласно [19] при погрешности измерения 0,1 м, масштабе поперечного профиля 1:100 и составляет 0,112 м:

$$\Delta h_b^* = k_\Delta \Delta h_b, \quad (11)$$

где k_Δ – соотношение суммы месячных значений Δh_b к измеренному годовому значению (в створе № 3 и 4 – по данным, полученным для соответствующих профилей, в створе № 1 и 2 – по данным для профиля № 3). Результаты расчётов транспортирующей способности потока S_{tr} и Δh_b^* по формулам (10, 11) приведены в табл. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о преобладании размыва донных отложений в верхней части рукава Хамлуонг (створы № 1 и 2) и аккумуляции наносов в его нижней части (створы № 3 и 4), что объясняется снижением средних ско-

ростей течения в результате усиления влияния приливных и сгонно-нагонных явлений и общего увеличения поперечного сечения русла. При этом следует отметить, что наибольшие скорости осаждения наносов в створе № 3 и 4 характерны для сентября и октября (в период муссонных дождей).

Таблица 3. Результаты расчёта транспортирующей способности потока (S_{tr}) и вертикальных деформаций (Δh_b^*) русла рукава Хамлуонг (средних значений по поперечному сечению)

Table 3. Results of calculation of transporting capacity of the flow (S_{tr}) and vertical deformations (Δh_b^*) of the Hamluong channel (average values along the cross-section area)

Период Period	Створ/Station							
	1 (72)		2 (49,5)		3 (14)		4 (1)	
	км/км							
S_{tr} , мг/дм ³ mg/dm ³	Δh_b^* , мм/с mm/s	S_{tr} , мг/дм ³ mg/dm ³	Δh_b^* , мм/с mm/s	S_{tr} , мг/дм ³ mg/dm ³	Δh_b^* , мм/с mm/s	S_{tr} , мг/дм ³ mg/dm ³	Δh_b^* , мм/с mm/s	
I	158,6	-64,87	156,2	-45,27	141,0	31,55	139,7	55,41
II	143,8	-60,59	130,9	-33,24	115,9	23,86	113,2	41,47
III	131,3	-55,55	118,1	-28,84	103,2	20,26	99,8	34,84
IV	122,4	-51,53	110,0	-26,12	96,6	18,49	93,1	31,69
V	132,2	-55,96	119,0	-29,15	104,0	20,48	100,7	35,23
VI	161,5	-65,27	155,8	-41,86	148,3	33,81	147,4	59,66
VII	178,1	-71,03	174,5	-48,32	177,0	43,01	176,9	76,49
VIII	210,3	-88,42	192,0	-54,17	203,2	51,84	196,6	88,27
IX	229,8	-99,46	203,6	-58,83	217,7	56,85	196,5	88,24
X	231,1	-100,25	204,4	-59,18	218,7	57,21	196,0	87,92
XI	208,6	-87,48	191,1	-53,87	201,9	51,40	196,0	87,94
XII	173,7	-68,76	172,1	-47,49	173,2	41,77	173,2	74,34
Год Year	170,0	-66,85	170,0	-46,78	170,0	40,72	170,0	72,47

2. На следующем этапе исследования выделяются участки с преобладающим размывом и аккумуляцией наносов. Для этого линейной интерполяцией определяется расстояние от морского края дельты до створа, в котором величина $\Delta h_b^* = 0$. В целом для года это расстояние составляет 31 км. Затем рассчитываются средние значения концентраций микроэлементов на участках водного объекта с преобладающим размывом и аккумуляцией наносов. Результаты расчёта по рукаву Хамлуонг приведены в табл. 4.

Если концентрации микроэлементов на участках с преобладающим размывом донных отложений и аккумуляцией наносов статистически различаются, то разница между ними может интерпретироваться как результат действия характерных для одного из участков процессов. В частности, повышенное значение концентрации микроэлементов в донных отложениях на участке преобладающей аккумуляции наносов может рассматриваться как результат действия процессов сорбции микроэлементов на оседающих частицах, выведения из раствора малорастворимых соединений и биогеохимических процессов.

Для рукава Хамлуонг была проведена проверка на однородность по средним значениям и дисперсиям с использованием критериев Стьюдента и Фишера при уровне значимости 5 % (критическое значение критерия Стьюдента 2,23, Фишера – 6,23). В результате сделан вывод о том, что статистически значимые различия характерны для мышьяка и ртути (табл. 4).

Таблица 4. Средние концентрации микроэлементов в донных отложениях рукава Хамлуонг на участках с преобладающей аккумуляцией и размывом, мг/кг

Table 4. Average concentrations of microelements in the bed load sediments in the Hamluong channel on the sites with prevailing accumulation and scour, mg/kg

Показатель/Index	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
Участок с преобладающей аккумуляцией наносов (0–31 км от морского края дельты) Site with prevailing accumulation of alluviations (0–31 km from the delta sea edge)						
Среднее арифметическое A Arithmetic mean A	98,689	35,110	4,977	1,456	7,617	0,131
Погрешность расчёта δ_A Calculation error δ_A	3,507	1,154	0,603	0,251	0,276	0,035
Суммарная погрешность δ_S Overall error δ_S	4,159	1,316	0,929	0,336	0,759	0,127
Участок с преобладающим размывом донных отложений (31–75 км от морского края дельты) Site with prevailing scour of bed load sediments (31–75 km from the delta sea edge)						
Среднее арифметическое A Arithmetic mean A	92,265	32,564	3,154	1,021	5,531	0,090
Погрешность расчёта δ_A Calculation error δ_A	6,322	0,970	0,466	0,287	0,510	0,007
Суммарная погрешность δ_S Overall error δ_S	6,705	1,158	0,847	0,364	0,872	0,123
Критерий Стьюдента k_{St} Student criterion k_{St}	0,73	1,54	1,63	0,99	2,94	4,06
Критерий Фишера k_F Fischer criterion k_F	0,22	0,99	0,47	0,54	0,21	0,16

Примечание: суммарная погрешность определена по формуле $\delta_S = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_A^2}$, где δ_A – погрешность расчёта среднего арифметического по формуле $\delta_A = \sigma N^{-0.5}$; δ_m – погрешность измерения (для используемого метода анализа); N – объём выборки; σ – среднее квадратическое отклонение.

Note: the overall error was determined by the formula $\delta_S = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_A^2}$, where δ_A is the error of the arithmetic mean calculation by the formula $\delta_A = \sigma N^{-0.5}$; δ_m is the calculation error (for the analysis technique applied); N is the sampling volume; σ is the standard deviation.

3. Затем рассчитывается масса микроэлементов в донных отложениях на участке с преобладанием аккумуляции наносов (табл. 5) с учётом пористости грунта при условии плотности наносов 2650 кг/м³ [18]. Объём аккумуляции наносов определяется суммированием частных объёмов наносов между расчётными створами, которые, в свою очередь, вычисляются умножением расстояния между смежными створами на среднее значе-

ние площади поперечного сечения (в створе 31 км от морского края дельты площадь сечения принимается равной нулю). В случае рукава Хамлуонг объём аккумуляции наносов составил 7927753 м³/год, масса – 12605128 т/год.

4. На основе полученных данных проводится расчёт массы осажённых микроэлементов умножением массы наносов, аккумулируемых на участке, на средние значения концентрации на участках преобладающего размыва донных отложений и аккумуляции наносов (табл. 5). Разница между полученными значениями аккумуляции As и Hg (пункт 2 рассматриваемого раздела) в случае рукава Хамлуонг интерпретируется как результат действия преимущественно процессов сорбции микроэлементов на оседающих частицах и выведения из раствора малорастворимых соединений (табл. 5). Вклад биогеохимических процессов непосредственно для крупных рукавов в дельте Меконга представляется менее значительным по сравнению с другими факторами (вследствие заметно более высоких скоростей течения относительно скоростей самоочищения вод согласно [20]). Но их роль, предположительно, возрастает при уменьшении скоростей течения в малых протоках и пойменных водоёмах.

В целом анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что 27 % от массы аккумуляции мышьяка в донных отложениях в нижней части рукава Хамлуонг и 31 % массы аккумуляции ртути связано с сорбцией микроэлементов на частицах осаждающихся наносов и с выведением из раствора малорастворимых соединений. Соответственно, 73 и 69 % массы аккумуляции указанных микроэлементов связаны с осаждением взвешенных частиц, в составе которых присутствуют As и Hg (иными словами – со взвешенной формой миграции в потоке). Формирование массы прочих изученных микроэлементов (Zn, Cu, Pb, Cd) в донных отложениях рукава Хамлуонг в основном также связывается с аккумуляцией взвешенных наносов (табл. 5).

В целях подтверждения этого вывода были выполнены термодинамические расчёты с использованием программного комплекса Solution+ [21], которые показали, что, во-первых, воды рукава Хамлуонг недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов и незначительно пересыщены относительно кварца. Во-вторых, в направлении от границы с Камбоджей до морского края дельты наблюдается уменьшение недонасыщенности поверхностных вод или даже их пересыщение относительно карбонатных минералов на участке до 13 км от морского края дельты (табл. 6). Таким образом, кроме «механического» изменения массы металлов в донных отложениях, связанного с аккумуляцией или эрозией последних, имеются условия для накопления химических элементов в донных отложениях вследствие потенциального усиления образования малорастворимых соединений по мере приближения к морю.

Таблица 5. Масса аккумуляции микроэлементов на участке с преобладающей аккумуляцией наносов (0–31 км от морского края дельты), т/год**Table 5.** Weight of accumulation of microelements on the site with prevailing alluviation accumulation (0–31 km from the delta sea edge), t/year

Показатель/Index		Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
Масса аккумуляции Accumulation weight	M_1 при средней концентрации, рассчитанной для участка 0–31 км от моря, т/год M_1 at average concentration calculated for the site 0–31 km from the sea, t/year	1243,987	442,566	62,736	18,353	96,013	1,651
	M_2 при средней концентрации, рассчитанной для участка 31–75 км от моря, т/год M_2 at average concentration calculated for the site 31–75 km from the sea, t/year	1163,012	410,473	39,757	12,870	69,719	1,134
Формальная разница ($M_1 - M_2$) Formal difference ($M_1 - M_2$)	без учёта проверки на однородность, т/год without test for homogeneity, t/year	80,975	32,093	22,979	5,483	26,294	0,517
	с учётом проверки на однородность, т/год considering test for homogeneity, t/year	0	0	0	0	26,294	0,517
	с учётом проверки на однородность, % от M_1 considering test for homogeneity, % of M_1	0	0	0	0	27,4	31,3

Таблица 6. Значения индекса насыщения вод рукава Хамлуонг в январе 2014 г.**Table 6.** Values of saturation index of the Hamluong channel water in 2014, January

Формула/Formula	Расстояние от морского края дельты, км Distance from the delta sea edge, km		
	75	35	9
CaCO_3 (кальцит) = $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-2,33	-1,93	-0,72
CaCO_3 (кальцит) + $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	-2,27	-1,88	-0,39
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (доломит) = $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	-4,24	-3,41	-0,06
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (доломит) + $2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$	-4,13	-3,31	0,59
MgCO_3 (магнезит) + $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	-5,80	-5,38	-2,96
SiO_2 (кварц) + $2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	0,37	0,36	0,32
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (анортит) + $3\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (каолинит) + $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	-258,0	-257,3	-257,3
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (анортит) + $2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (каолинит) + Ca^{2+}	-23,10	-21,52	-21,70
$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (альбит) + $11\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (каолинит) + $2\text{Na}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-10,74	-9,87	-6,00
$3\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (ортоклаз) + $2\text{H}^+ + 12\text{H}_2\text{O} = \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (мусковит) + $2\text{K}^+ + 6\text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-23,10	-22,29	-19,30

Примечание: отрицательные значения свидетельствуют о недонасыщенности раствора, положительные – о пересыщении.

Note: negative values indicate the solution undersaturation, the positive ones indicate its oversaturation.

Выводы

Состояние поверхностных вод и донных отложений в дельте Меконга в целом оценивается как неудовлетворительное, причём содержание микроэлементов в донных отложениях увеличивается по мере приближения к морю. Важным фактором этого увеличения являются русловые процессы.

Для количественной оценки связи геохимических и гидрологических процессов предложена методика, основанная на использовании метода А.В. Караушева [18] для расчёта русловых деформаций. Её апробация показала, что, во-первых, аккумуляция наносов преобладает на участке рукава Хамлуонг 0–31 км от морского края дельты. Во-вторых, в пределах этого участка ежегодно оседает, т/год: Zn – 1244; Cu – 443; Pb – 63; Cd – 18; As – 96; Hg – 1,7. В-третьих, в дельте Меконга основная часть массы Zn, Cu, Pb, Cd, 73 % массы As и 69 % массы Hg формируется за счёт осаждения частиц наносов, с которыми (во взвешенной форме) переносятся указанные микроэлементы. 27 % массы As и 31 % массы Hg связано с сорбцией на осаждающихся частицах и выведением из раствора малорастворимых соединений.

Для сельскохозяйственного использования наиболее оптимально применение донных отложений, изъятых в дельте Меконга на участке от 31 до 15 км, где: 1) преобладает аккумуляция донных отложений над их размывом (табл. 5); 2) содержание макро- и микроэлементов меньше значений, при которых возможно засоление почв и угнетение неспецифических видов растений. Донные отложения на участке 0–15 км с наиболее высокими концентрациями токсичных микроэлементов целесообразно использовать для строительных нужд при инженерной защите прибрежных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доан Ван Фук. Исследование воды для сельского хозяйства. – Бенче: Департамент науки и технологии, 2012. – 77 с. на вьетнам. яз.
2. Статистический ежегодник провинции Бентре 2012 года / под ред. Ле Тхи Тху Нгует и др. – Бентре: Департамент статистики провинции Бентре, 2012. – 98 с. / на вьетнам. яз.
3. Совместное управление устьями реки Меконг. – СРВ, Провинция Бенче: Министерство сельского хозяйства и развития сельских местностей, 2010. – 272 с. / на вьетнам. яз.
4. Тон Тхат Хань. Экологический мониторинг в провинции Бен Тре. – Бен Тре: Департамент науки и технологии, 2013. – 139 с. / на вьетнам. яз.
5. Хо Тронг Тиен. Исследование изменений боковой приточности речных каналов в провинции Бенче, планирование решений по инженерной защите территорий. – СРВ, Бенче: Научно-исследовательский Институт водного хозяйства юга, 2001. – 98 с. / на вьетнам. яз.
6. Хо Тронг Тиен. Планирование орошения в провинции Бен Тре. – Бен Тре: Южный гидротехнический институт, Академия науки и технологий Вьетнама, 2011. – 43 с. / на вьетнам. яз.
7. Diagnostic study of water quality in the Lower Mekong Basin // Mekong River Commission Technical Paper. № 15. – Vientiane, LAO DPR: MRC, 2007. – 58 p.
8. The planning Atlas of the Lower Mekong River Basin // Mekong River Commission. – Vientiane: MRC, 2011. – 104 p.
9. An assessment of water quality in the Lower Mekong Basin // Mekong River Commission Technical Paper, № 19. – Vientiane, LAO DPR: MRC, 2008. – 70 p.
10. Hurt B.T., Jones M.J., Pistone G. Transboundary Water Quality Issues in the Mekong River Basin // Mekong River Commission. – Australia: Water Studies Centre, Monash University, 2001. – 77 p.
11. The Mekong River Report Card on Water Quality. V. 2. Assessment of Potential Human Impacts of Mekong River water quality // Mekong River Commission. – Vientiane, Lao DPR: MRC, 2010. – 15 p.
12. Михайлов В.Н., Аракельянц А.Д. Особенности гидрологических и морфологических процессов в устьевой области р. Меконг // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 3. – С. 259–273.
13. River changes along the Mekong River: Remote sensing detection in the Vietnam – Nong Khai area / Kumu Matti, X.X. Lu, A. Rasphone, J. Sarkkula, J. Koponen // Quaternary International. – 2008. – V. 196. – P. 1000–1012.
14. Meshkova L.V., Carling P.A. The geomorphological characteristics of the Mekong River in northern Cambodia: A mixed bedrock-alluvial multi-channel network // Geomorphology. – 2012. – № 147–148. – P. 2–17.
15. Prathumratana L., Sthiannopkao S., Kim K.W. The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River // Environment International. – 2008. – № 34. – P. 860–866.
16. Государственная техническая норма качества воды (QCVN 38:2011/ VTNMT). – Ханой: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2011. – 6 с. / на вьетнам. яз.
17. Государственный технический стандарт качества речных донных отложений (QCVN XX:2012/ VTNMT). – Ханой: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2012. – 21 с. / на вьетнам. яз.
18. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
19. ВСН 163–83. Учёт деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). – М.: ВНИИСТ Миннефтегазстрой, Госкомгидромет СССР, Госстрой СССР. 1985. – 142 с.
20. Справочник по гидрохимии / под ред. А.М. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 391 с.
21. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.

Поступила 28.09.2014 г.

UDC 556.06:551.482.212

RELATIONS BETWEEN MICROELEMENT COMPOSITION OF BED LOAD SEDIMENTS AND SEDIMENTATION IN DELTA OF THE MEKONG RIVER (VIETNAM)

Oleg G. Savichev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: OSavichev@mail.ru

Phung Thai Duong,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: phungthaiduongdhdt@gmail.com

Relevance. The research of formation mechanisms of natural and natural-anthropogenous geochemical anomalies in water objects plays the extremely important role in geology and geocology is the required stage in developing long-term forecasts of ecosystems state and planning nature protection actions. One of the key aspects of the problem – the revealing of the relations between geochemical and hydrological processes in a delta of the big river – is considered by the example of the largest river of Indochina – the Mekong river. The choice of the object is caused by the value of the river in social and economic development of southeast Asia.

The aim of the research is to reveal the relations between the formation of bed load sediments in the delta of the Mekong river (Vietnam) and their microelement composition.

Methods of the research: landscape-geochemical and geography-hydrological methods, mathematical modelling of hydrological processes.

Results and conclusions. The authors have obtained the data on microelement composition of the bed load sediments in the delta of the Mekong river and have estimated the deformations of the river channel (the Hamluong channel) using the method of A.V. Karashev by the surveying works in 1999 and 2000 in cross-sections, located in 72, 49, 14, 1 km from sea edge of delta. It was ascertained that accumulation of sediments prevails on a site of the Hamluong channel of 0–31 km from sea edge of the delta. Based on the data of the geochemical approbation which has been carried out by Phung Thai Duong in 2013–2014 it is shown, that within this site 1244 tons of Zn; 443 tons of Cu; 63 tons of Pb; 18 tons of Cd; 96 tons of As; 1,7 tons of Hg annually settle. In the delta of the Mekong river the basic part of weights of Zn, Cu, Pb, Cd, As 73 wt. % and Hg 69 wt. % are formed due to sedimentation of particles with the specified microelements (in the suspended form). As 27 wt. % and Hg 31 wt. % are related with sorbtion on besieged particles and removing poorly soluble substances from a solution. The authors made a conclusion that the application of the bed load sediments withdrawn in the delta of the Mekong river on a site from 31 up to 15 km is optimal for agricultural use. It is appropriate to use the river sediments on a site of 0–15 km with the highest concentrations of toxic microelements for building needs at engineering protection of coastal territories.

Key words:

Delta of the Mekong river, Vietnam, river sediments, microelement composition, channel deformations.

REFERENCES

- Doan Van Phuk. *Issledovanie vody dlya selskogo khozyaistva* [Research of water for agriculture]. Benche, Department of science and technology, 2012. 77 p. / in Vietnam.
- Statisticheskiy ezhegodnik provintsii Bentre 2012 goda* [A statistical year-book of Bentre province of 2012]. Eds. Le Tkhi Tkhu Nguet. Bentre, Department of Bentre province statistics, 2012. 98 p. / in Vietnam.
- Sovmestnoe upravlenie ustyami reki Mekong* [A joint management of the Mekong river delta]. SRV, Benche, Ministry of Agriculture and Development of rural areas, 2010. 272 p. / in Vietnam.
- Ton Tkhat Khan. *Ecologicheskoy monitoring v provintsii Bentre* [Ecological monitoring in Bentre province]. Bentre, Department of science and technology, 2013. 139 p. / in Vietnam.
- Kho Trong Tien. *Issledovanie bokovoy pritochnosti rechnykh kanalov v provintsii Benche, planirovanie resheniy po inzhenernoy zashchite territoriy* [Research of changes in lateral flow to river channels in Benche provinces, planning the decisions on engineering protection of territories]. SRV, Benche, Research Institute of water industry in the south, 2001. 98 p. / in Vietnam.
- Kho Trong Tien. *Planirovanie orosheniya v provintsii Bentre* [Planning of irrigation in Bentre province]. Bentre, South Hydro-technical Institutre, 2011. 43 p. / in Vietnam.
- Diagnostic study of water quality in the Lower Mekong Basin. *Mekong River Commission Technical Paper, № 15*. Vientiane, LAO DPR: MRC, 2007. 58 p.
- The planning Atlas of the Lower Mekong River Basin. *Mekong River Commission*. Vientiane, MRC, 2011. 104 p.
- An assessment of water quality in the Lower Mekong Basin. *Mekong River Commission Technical Paper, № 19*. Vientiane, LAO DPR: MRC, 2008. 70 p.
- Hurt B.T., Jones M.J., Pistone G. *Transboundary Water Quality Issues in the Mekong River Basin*. *Mekong River Commission*. Australia, Water Studies Centre, Monash University, 2001. 77 p.
- The Mekong River Report Card on Water Quality. V. 2. Assessment of Potential Human Impacts of Mekong River water quality. *Mekong River Commission*. Vientiane, Lao DPR: MRC, 2010. 15 p.
- Mikhaylov V.N., Arakeliants A.D. *Osobnosti gidrologicheskikh i morfologicheskikh protsessov v ustievoy oblasti r. Mekong* [The feature of hydrological and morphological processes in delta of the Mekong river]. *Vodnye resursy – Water resources*, 2010, vol. 37, no. 3, pp. 259–273.
- Kumu Matti, Lu X.X., Rasphone A., Sarkkula J., Koponen J. *River changes along the Mekong River: Remote sensing detection in the Vietnam – Nong Khai area*. *Quaternary International*, 2008, vol. 196, pp. 1000–1012.
- Meshkova L.V., Carling P.A. *The geomorphological characteristics of the Mekong River in northern Cambodia: A mixed bedrock–alluvial multi-channel network*. *Geomorphology*, 2012, no. 147–148, pp. 2–17.
- Prathumratana L., Sthiannopkao S., Kim K.W. *The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River*. *Environment International*, 2008, no. 34, pp. 860–866.
- Gosudarstvennaya tekhnicheskaya norma kachestva vody* [The state technical norm of water quality] (QCVN 38:2011/ BTNMT). Khanoi, Ministry of Natural Resources and Environment Protection, 2011. 6 p. / in Vietnam.
- Gosudarstvenny tekhnicheskyy standart kachestva rechnykh donnykh otlozheniy* [The state technical quality standard of river sediments] (QCVN XX:2012/ BTNMT). Khanoi, Ministry of Natural Resources and Environment Protection, 2012. 21 p. / in Vietnam.
- Karashev A.V. *Rechnaya gidravlika* [A river hydraulics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 416 p.
- VSN 163–83. Uchet deformatsy rechnykh rusel i beregov vodoe-mov v zone podvodnykh perekhodov magistralnykh truboprovodov (neftegazoprovodov)* [The account of deformations of river channels and coast of reservoirs in a zone of underwater transitions of the main pipelines (oil and gas pipelines)]. Moscow, VNIIST Minneftegazstroj, Goskomgydromet SSSR, Gosstroj SSSR. 1985. 142 p.
- Spravochnik po gidrokhimii* [The directory in hydrochemistry]. Ed. by A.M. Nikanorov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 391 p.
- Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. *Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami* [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologia – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.

Received: 28 September 2014.

УДК 553.411.071:553.241.1:[552.313+552.333.4]

ПЕТРОЛОГИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО МЕТАСОМАТИЗМА ДОЛЕРИТОВ ВНУТРИРУДНЫХ ДАЕК МЕЗОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА. Ч. 2. МЕСТОРОЖДЕНИЕ ЗУН-ХОЛБА (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

Кучеренко Игорь Васильевич,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: Kucherenko.o@sibmail.com

Актуальность исследования определяется потребностью разработки геолого-генетической концепции (теории) образования гидротермальных месторождений золота взамен четырех исключаящих одна другую гранитогенной, базальтогенной, метаморфогенной, полигенной гипотез.

Цель работы: обоснование золотопродуцирующей способности базальтового магматизма – геологического процесса, инициирующего и обеспечивающего рудообразование.

Методы исследования: петрологическое изучение производных магматизма и сопровождающего метасоматизма посредством эмпирических наблюдений в золоторудных месторождениях пространственно-временных соотношений магматических, метасоматических пород и рудно-минеральных комплексов, диагностики минералов с использованием электронного микроскопа с рентгеноспектральным сопровождением, балансовых петрохимических расчетов полных химических силикатных анализов горных пород для оценки миграции петрогенных элементов и металлов в метасоматических процессах этапов рудообразования.

Результаты. Установлено, что обнаруженные в месторождении Зун-Холба послегранитные внутрирудные дайки – тепловые флюидопроводники умеренно щелочных долеритов, как и в Кедровском месторождении, залегают среди слабоизмененных гранитоидов Амбартогольского массива и других пород, но преобразованы в метасоматиты, сложенные биотитом (до 60 об. %) в сопровождении магнезиально-железистой обыкновенной роговой обманки, антигорита, хлорита, серицита, кварца, карбонатов, рутила, лейкоксена, пирита в разных количественных соотношениях. Диагностирован биотит ранней генерации, частично замещенный перечисленными минералами, и свежий биотит поздней генерации, чешуйки которого обрамляют полностью замещенные кристаллы былого авгита. Образование позднего биотита после отложения сравнительно низкотемпературных хлорита и других метасоматических минералов оценивается как доказательство пульсационного режима поступления металлоносных флюидов, свойственного и процессу отложения рудно-минеральных комплексов в рудных телах. Балансовыми расчетами установлен наследуемый околорудным метасоматизмом калиево-сернисто-углекислотный профиль внутридайкового метасоматизма на путях подъема металлоносных флюидов с привнесом и фиксацией в метасоматитах калия, магния (до 50 мас. %), углекислотного углерода (до 500 мас. %), восстановленной серы (до 160 мас. %), в других месторождениях – титана, фосфора, кальция, марганца, золота, серебра. Поскольку дайки долеритов способны выполнять флюидопроводящую функцию согласно известному физическому эффекту только в горячем состоянии среди холодных пород, металлоносные флюиды поднимались по дайкам вслед за базальтовыми расплавами по тем же разломам через промежутки времени, в течение которых дайки не успевали остыть. Подобные преобразованные в метасоматиты внутрирудные дайки-флюидопроводники умеренно щелочных долеритов известны в других залегающих в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев мезотермальных месторождениях золота – Сухоложском, Чертово Корыто, Кедровском, Уряхском, Беркульском, Березовском, Кочкарском. В сочетании с массивами ранних гранитоидов и сменяющих их диоритоидов они образуют магматические комплексы, повторяющиеся во времени и пространстве. По совокупности данных доказываемся образование золотого оруденения в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев на завершающем базальтоидном этапе становления антидромных гранит-диорит-долеритовых магматических комплексов, приобретающих в силу этого статус золотопродуцирующих флюидно-рудно-магматических.

Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота, петрология, гидротермальный метасоматизм, внутрирудные долеритовые дайки, тепловые флюидопроводники, флюидно-рудно-магматические комплексы.

Введение

Одна из ключевых, имеющих теоретическое и прикладное значение задач исследования гидротермального рудообразования заключается в реконструкции инициирующих и обеспечивающих его более масштабных геологических процессов. Решение этой задачи предполагает выяснение источников энергии, растворов, рудного вещества, транспортных путей перемещения металлоносных растворов на верхние этажи земной коры, то есть всего того, что вместе с образованными на этих этапах месторождениями полезных ископаемых составляет понятие «рудообразующие системы». Последние, за редкими исключениями, прекратили свое существование задолго до проявленного к ним

интереса со стороны человеческого сообщества и поэтому не могут изучаться в процессе функционирования. Более того, недоступны для непосредственного наблюдения и изучения все нижние элементы былых рудообразующих систем. Единственным источником информации, обеспечивающим формирование ответа на вопрос «а как это происходит в природе?», служат конечные продукты процессов – породы и ассоциированные с ними руды.

Эта информация составляет основу для диагностики условий залегания, минералого-химического состава и строения горных пород и руд, реконструкции термодинамических и физико-химических параметров их образования, доказательства

последовательности геологических событий, причинно-следственных связей рудообразования в целом и отдельных его этапов (стадий) с конкретными проявлениями петро-рудно-генетических процессов в объеме каждой индивидуальной рудообразующей системы. Успех работы зависит от доступности объектов для исследования, в том числе на глубоких горизонтах, и в не меньшей степени от понимания того, что надлежит изучать все вещество, созданное в петро-рудно-генетическом процессе.

Недооценка многими участниками дискуссии последнего условия привела к негативным последствиям – созданию и сосуществованию в течение многих десятилетий и до сего времени конкурирующих между собой и взаимно исключающих одна другую четырех с вариантами гипотез образования, например, собственно золотых гидротермальных месторождений. При разработке гранитогенной гипотезы их образования, в частности, недооценка выразилась в игнорировании магматических пород малых форм, как правило, даек, обычно сопровождающих, сменяющих во времени крупные тела (плутоны, массивы) гранитоидов, с которыми многие исследователи генетически связывают близкие к ним по возрасту месторождения. Основанием для этого послужило популярное в прошлом и сейчас представление, согласно которому генерация крупных масс металлоносных растворов, необходимых для образования промышленных месторождений, возможна только в крупнообъемных очагах сравнительно обводненных гранитоидных расплавов [1]. По необъясненными причинам считалось и считается, что силикатные расплавы иного, скажем, базитового состава не занимают в верхних оболочках планеты значительные объемы – их послегранитные, но близкие к гранитам и рудам производные сопровождают плутоны всего лишь в форме даек, что однако не может означать отсутствие в глубинах мантии крупнообъемных магматических очагов.

На ошибочность указанного представления и следующего из него подхода в исследовании связей гидротермального рудообразования с магматизмом еще полвека назад обращали внимание коллег известные ученые Ф.И. Вольфсон и В.Н. Котляр, высказывания которых приведены в первой части статьи [2]. Вероятно, отсутствие в течение длительного времени корректных доказательств существования таких связей в рамках двух известных магматогенных – гранитогенной и базальтогенной – гипотез и невозможность переквалифицировать в силу этого одну из них в теорию способствовало появлению альтернативных метаморфогенной и полигенной гипотез, которые по причине их ущербности в силу также невысокой обоснованности не сняли дискуссию, но усугубили ситуацию без надежды на скорое корректное решение проблемы.

В данной второй завершающей части статьи продолжено представление материалов, доказывающих на примере крупного месторождения зо-

лота Зун-Холба функционирование рудообразующей системы на позднем базальтоидном этапе становления одного из повторяющихся во времени и пространстве золотопроизводящих антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-рудно-магматических комплексов в согласии с концепцией, объединяющей гранитогенную и базальтогенную гипотезы [3–5]. К обсуждению материалов также привлечены данные, характеризующие внутридайкавый метасоматизм в других месторождениях золота. В заключение сформулированы следующие из анализа материалов и их обсуждения выводы.

Минералого-петрохимические черты внутридайкавых аподолеритовых метасоматических ореолов Зун-Холбинского месторождения

В Зун-Холбинском месторождении, в отличие от Кедровского [2], дайки внутрирудных долеритов немногочисленны, пересекают в рудовмещающем разломе крутопадающие залежи прожилково-крапленых руд и березитизированные плагиограниты Амбартогольского массива в обрамлении разлома, чем доказываемся, в частности, их послегранитный дорудный возраст, но пересекаются поздними сульфидно-кварцевыми прожилками, следующими, кроме того, и контактам даек на протяжении до десятков см.

Одна из наименее гидротермально измененных даек (табл. 5, проба 1), относительно которой выполнены балансовые петрохимические расчеты, характеризующие перемещение вещества при метасоматизме, имеет черный цвет, массивное сложение, порфирированное строение с мелкозернистой долеритовой структурой основной массы.

Порфирированные выделения занимают около 20 % объема породы, сложены субизометричными четырехугольными со «срезанными» углами, удлиненными кристаллами, агрегатами зерен иногда зонального авгита (рисунок, а, б, табл. 1) размером до 1,5 мм с участием редких беспорядочно ориентированных таблитчатых кристаллов лабрадора (№ 52...57). Фенокристы авгита имеют четкие контакты с вмещающей массой, плеохроируют от буровато-розового до бледно-голубого цвета. Авгит в некоторых порфирированных выделениях частично замещен агрегатами зерен кальцита и/или буровато-бледнозеленого серпентина (антигорита) с участием хризотила, волокна которого, как и в промышленных жилах, ориентированы нормально к прожилкам.

Основная масса породы сложена агрегатом мелких, размером до первых десятых долей мм, зерен авгита и удлиненных, с соотношением сторон до 1:10, разноориентированных лейст основного плагиоклаза примерно в равных количественных соотношениях, с примесью микрозерен калиевого полевого шпата (табл. 2), магнетита, апатита. По минимальному для основных магматических пород содержанию кремнезема при соразмерных содержаниях других петрогенных компонентов опи-

Таблица 1. Химические составы авгита внутрирудных даек умеренно щелочных долеритов Зун-Холбинского месторождения
Table 1. Chemical compositions of augites in intra-ore dikes of moderate-alkaline dolerites of Zun-Kholba deposit

Рентгеноспектры X-ray spectra	Содержание, мас. %/Content, wt. %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	Σ
1	47,89	7,13	22,75	13,38	6,32	1,37	–	–	0,43	0,73	100,00
2	48,86	7,00	22,39	13,88	5,78	1,10	–	–	0,35	0,64	100,00
3	46,25	8,59	22,17	11,88	8,89	1,46	0,17	0,10	0,43	–	99,94
4	44,73	9,73	22,25	11,67	7,92	2,82	–	–	0,57	0,31	100,00
5	48,27	6,77	22,84	13,53	6,02	1,52	–	–	0,38	0,68	100,01
6	43,97	10,60	22,72	10,92	8,85	2,50	–	–	0,45	–	100,01
7	50,40	4,41	22,54	14,25	7,03	1,04	–	–	0,33	–	100,00
8	44,87	10,13	22,36	11,21	8,81	2,18	–	–	0,44	–	100,00
9	50,86	3,98	22,55	15,37	5,76	0,84	–	–	0,26	0,39	100,01
10	48,60	6,70	22,62	13,88	6,21	1,21	–	–	0,40	0,39	100,01
11	46,40	7,17	22,70	10,85	10,94	1,48	–	–	0,47	–	100,01
12	46,85	7,51	22,55	12,15	9,10	1,50	–	–	0,33	–	99,99
*	46,47...51,86	2,33...10,55	18,92...23,34	12,07...15,06	6,39...17,28	0,50...2,96	0,01...0,30	0,00...0,28	0,00...0,43	0,00...1,06	–

Примечание: 1) Здесь и в табл. 2–4 в FeO дано валовое содержание железа. 2) * – интервалы нормативных содержаний петрогенных компонентов [б. С. 122].

Note: here and in tables 2–4 the total content of iron is given. 2) * – the intervals of standard contents of petrogenic components [б. С. 122].

санный долерит близок (табл. 5) к трахибазальту (умеренно щелочному долериту) [7].

В основной массе неравномерно (пятнообразно) распределены диагностированные термическим и рентгеноспектральными анализами новообразованные минералы: кальцит, хлорит, монтмориллонит, серпентин, серицит, альбит, кварц, рутил, лейкоксен, пирит. Количество их в сумме не превышает 10 об. %. Эпизодически только среди новообразованных минералов фиксируются микрочешуйки бурого биотита.

Таблица 2. Химические составы калиевого полевого шпата внутрирудных даек умеренно щелочных долеритов Зун-Холбинского месторождения

Table 2. Chemical compositions of feldspar in intra-ore dikes of moderate-alkaline dolerites of Zun-Kholba deposit

Рентгеноспектры X-ray spectra	Содержание, мас. %/Content, wt. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	CaO	MgO	Σ
1	64,14	19,53	12,82	2,39	0,41	0,72	–	100,01
2	63,51	20,37	11,43	2,96	0,27	1,45	–	99,99
3	64,78	19,45	12,68	2,39	–	0,71	–	100,01
4	64,35	19,55	12,40	2,37	0,35	0,98	–	100,00
5	63,08	20,26	10,19	3,56	0,53	2,09	0,28	99,99
6	64,00	19,86	11,57	2,92	0,34	1,31	–	100,00

В зонах закалки порода сложена стеклом буровато-зеленого, зеленовато-бурого до черного (пятнами) цвета с микролитами авгита и разноориентированных игловидных лейст плагиоклаза.

Интенсивно гидротермально измененный долерит (табл. 5, пробы 31, 41, 46) фактически представляет собой метасоматит, так как до 100 % его объема сложено перечисленными минеральными образованиями гидротермального этапа. Интенсивно гидротермально изменены, как правило,

сравнительно крупные дайки мощностью 0,4...0,5 м и более. В процессе и после метасоматических преобразований они сохранили черный цвет, «спаянные» («сваренные») контакты с вмещающими породами, массивное сложение, но приобрели порфиробластовую, лепидогранобластовую, гранолепидобластовую средне-, крупнозернистую структуру. Вследствие частичного или полного сохранения свежими порфириновых выделений авгита, в отличие от основной массы породы, и сильно замещенного едва улавливаемого лабрадора в метасоматите просматривается реликтовая порфирировая структура (рисунок, а, б). Примерно половина порфириновых выделений авгита замещена в разной степени, вплоть до скелетных форм и полностью, агрегатами новообразованных минералов в разных сочетаниях и количественных соотношениях (рисунок, в, г). В сростаниях кристаллов пироксена иногда одно–два зерна замещены полностью, соседние зерна в том же агрегате сохранились свежими.

Участвующий в составе эпигенетических минеральных новообразований бурый, красно-бурый плеохроирующий до бледно-желтого цвета биотит (табл. 3) двух – ранней и поздней – генераций не встречается в «останцах» свежего долерита, при этом поздний биотит не несет признаков замещения другими минералами. Его, как правило, удлиненные чешуйки с соотношением сторон до 1:10...1:15 размером до 1,0...1,5 мм беспорядочно ориентированы среди эпигенетических минералов. Наиболее крупные чешуйки имеют более изометричные очертания и представляют порфиробласты. По периметру полно или частично, в том числе псевдоморфно, замещенных кристаллов пироксена (и оливина?) чешуйки биотита образуют «венчики», изменяя ориентировку в соответствии

Таблица 3. Химические составы биотита аподолеритовых метасоматитов внутрирудных даек Зун-Холбинского месторождения
Table 3. Chemical compositions of biotite of apodolerite metasomatites in intra-ore dikes of Zun-Kholba deposit

Рентгеноспектры X-ray spectra	Содержание, мас. %/Content, wt. %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	FeO	TiO ₂	MnO	BaO	Σ
1	36,91	16,04	9,23	0,60	0,17	19,35	8,45	3,87	–	0,88	95,50
2	36,21	16,68	9,13	0,79	0,00	16,83	12,02	3,13	–	0,72	95,51
3	36,61	16,26	9,32	0,66	0,16	19,01	9,02	3,87	–	0,58	95,49
4	36,39	16,38	8,97	0,56	–	17,55	11,24	3,76	–	0,64	95,49
5	36,63	16,31	9,11	0,72	–	18,17	10,53	4,03	–	–	95,50
6	36,40	16,49	9,12	0,60	–	18,61	10,29	3,98	–	–	95,49
7	35,08	14,16	9,16	0,21	0,00	8,91	24,34	3,32	0,32	–	95,50
8	34,53	16,57	8,8	0,56	0,19	12,01	17,96	3,93	0,24	0,74	95,53
9	34,97	17,13	8,14	1,40	0,17	5,48	24,50	2,53	1,17	–	95,49
10	32,78	16,77	8,80	0,37	0,30	4,72	27,35	3,33	1,08	–	95,50
11	32,53	15,62	8,79	0,37	0,51	4,02	29,29	3,33	1,04	–	95,50
12	36,89	15,17	8,61	0,80	–	8,20	22,43	2,84	0,56	–	95,50
13	35,17	14,68	9,40	–	0,92	10,07	21,82	3,17	0,28	–	95,51

с изменением ориентировки границ бывших кристаллов (рисунок, в, г). По периметру свежих кристаллов пироксена чешуйки биотита всегда отсутствуют (рисунок, а, б). Узкие чешуйки («иголки») биотита также пересекают тонкозернистые кварц-кальцит-серицитовые агрегаты, заместившие кристаллы лабрадора в фенокристаллах и в основной массе. Тончайшие пластинки биотита, толщиной до нескольких тысячных долей мм, пересекают агрегаты новообразованных минералов, заместивших и бывшие кристаллы пироксена, переходя за их пределы в тонкозернистые агрегаты серицита, кальцита, рутила, образованные за счет плагиоклаза.

Бледно-желтый, бледно-зеленовато-желтый слабо плеохроирующий серпентин (антигорит) иногда замещает пироксен (возможно, оливин), свежие зерна которого в породе отсутствуют) псевдоморфно сравнительно крупными чешуйками. В чешуйках антигорита сохраняются трещины отдельности исходного минерала, заполненные магнетитом, иногда хризотилом с нормальной к границам трещин ориентировкой волокон. Замещенные зерна пироксена часто окаймлены «сыпью» зерен магнетита с размером микрокристаллов до первых сотых долей мм, которая, кроме того, в форме неправильных скоплений встречается среди других замещающих минералов. Магнетит заполняет и границы между чешуйками серпентина.

Мельчайшие скопления чешуек зеленого плеохроирующего до бледно-желтого цвета хлори-

та образованы по трещинам или гнездами внутри пластинок антигорита или по их периферии.

Плагиоклаз в фенокристаллах и лейстах основной массы породы замещен преимущественно агрегатами серицита, кварца, кальцита, или серицита и кварца, или серицита при отсутствии минералов ряда цоизит–эпидот, но эпизодически в его кристаллах можно видеть реликтовое полисинтетическое двойникование. Отсутствие минералов эпидотовой группы в продуктах гидротермального замещения основного плагиоклаза необычно. Вместе с тем только в агрегатах новообразованных минералов присутствуют зерна бледно-зеленой магнезиально-железистой обыкновенной роговой обманки с характерной спаянностью (табл. 4).

Рутил, лейкоксен в виде скоплений иголок, дендритовидных кристаллов размером до первых десятых долей мм сравнительно равномерно рассеяны в реликтовых лейстах лабрадора и агрегатах новообразованных минералов, не содержащих титан, но заместивших пироксен. Оба минерала отсутствуют в свежих кристаллах пироксена.

Описанные преобразования минерального состава пород происходили в условиях калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма (табл. 5). В аподолеритовых метасоматитах вдвое увеличено содержание калия, до 50 % магния, на 500 % – углекислотного углерода, до 160 % – восстановленной серы, зафиксированных соответственно в биотите, карбонатах, пирите, – минералах, не

Таблица 4. Химические составы магнезиально-железистой обыкновенной роговой обманки аподолеритовых метасоматитов внутрирудных даек Зун-Холбинского месторождения

Table 4. Chemical compositions of magnesian-ferrous hornblende of apodolerite metasomatites in intra-ore dikes of Zun-Kholba deposit

Рентгеноспектры X-ray spectra	Содержание, мас. %/Content, wt. %										
	SiO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Σ
1	39,51	14,09	11,66	13,22	13,64	0,90	0,25	2,14	1,96	0,63	98,00
2	39,27	14,26	11,67	13,21	13,50	0,79	0,21	2,17	2,24	0,67	97,99
**	44,0...50,0	4,5...14,5	9,0...12,5	7,0...18,0	6,0...26,0	до 2,0	до 1,3	0,05...2,7	0,5...3,4	–	–

Примечание: ** – интервалы нормативных содержаний петрогенных компонентов [8. С. 120].

Note: ** – intervals of standard contents of petrogenic components [8. С. 120].

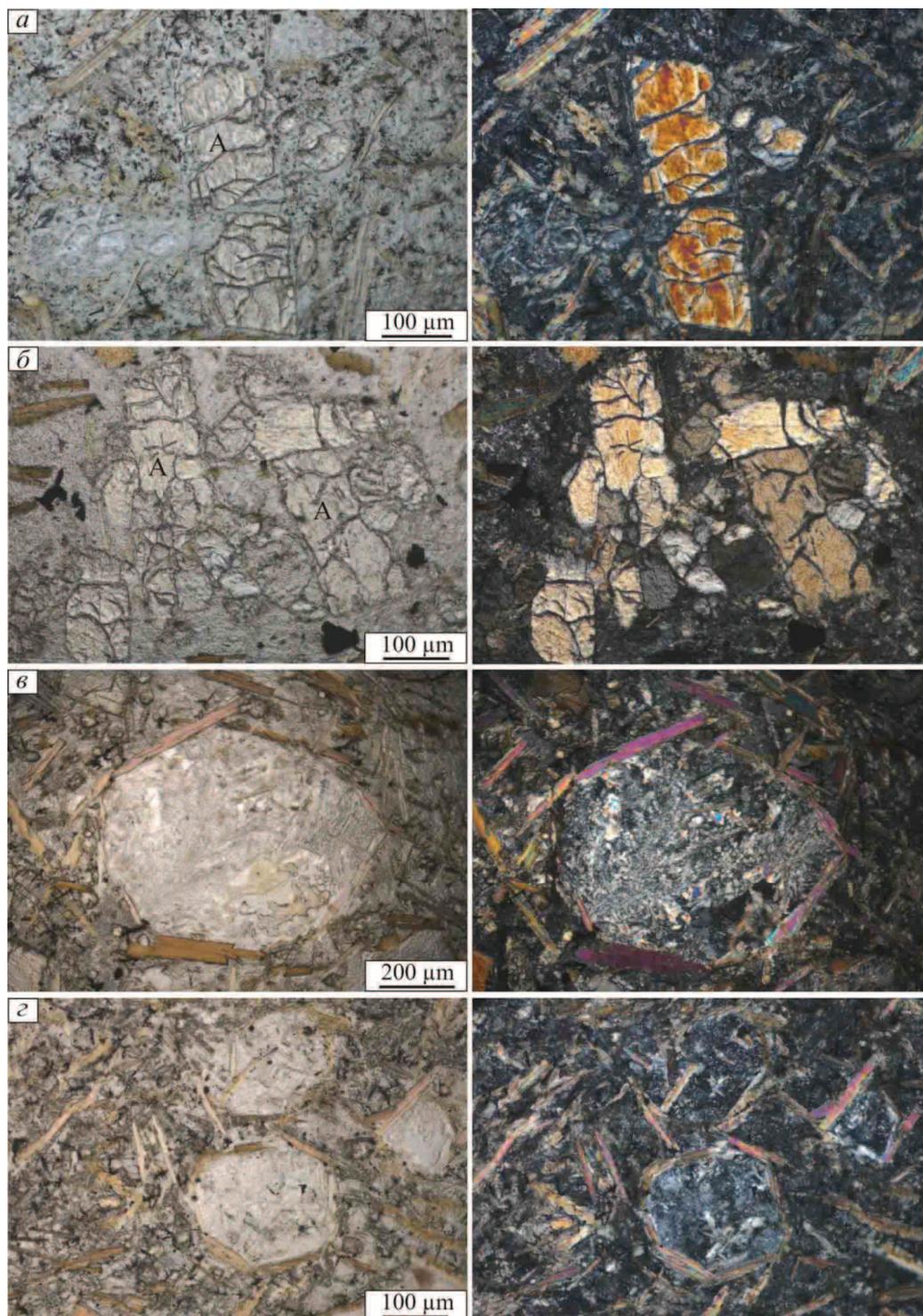


Рисунок. Зун-Холбинское месторождение. Микрофотографии шлифов не измененных в «останцах» внутрирудных умеренно щелочных долеритов (а, б) и аподолеритовых метасоматитов в участках интенсивного изменения (в, г). Кристаллы (фенокристы) свежего авгита (А) не сопровождаются чешуйками биотита (а, б). Былые кристаллы авгита, полностью замещенные тонкозернистыми агрегатами эпигенетических минералов этапа метасоматизма, обрамлены «венчиками» чешуек бурого биотита (в, г). Беспорядочно ориентированные чешуйки бурого биотита в числе других эпигенетических минералов также участвуют в сложении основной массы породы. Слева без анализатора, справа с анализатором

Figure. Zun-Kholba deposit. Microphotographs of thin rock section unchanged in «remnants» of intra-ore moderate alkaline dolerites (a, б) and apodolerites metasomatites in the areas of intense alteration (в, г). Crystals (phenocrysts) of fresh augite (A) are not accompanied by biotite lamina (a, б). Former crystals of augite are fully substituted by fine-grain aggregate of epigenetic minerals at the stage of metasomatism, framed by «halos» of brown biotite lamels (в, г). Randomly oriented lamels of brown biotite participate in groundmass formation among other epigenetic minerals. With analyzer is on the left, without it is on the right

Таблица 5. Химические составы исходного и гидротермально измененных долеритов внутрирудных даек и баланс химических элементов в аподайковых метасоматических ореолах Зун-Холбинского месторождения**Table 5.** Chemical compositions of original hydrothermally changed dolerites in intra-ore dikes and the balance of chemical elements in apodike metasomatic halos of Zun-Kholba deposit

Номера проб Sample number	Содержание окислов в мас. % (первая строка). Величина привноса, выноса (-) атомов элементов в стандартном геометрическом объеме 10000 Å ³ в % к числу их атомов в стандартном геометрическом объеме исходной породы (вторая строка) Oxide content in wt. % (first line). Value of gain and setting-out (-) of the elements atoms in standard geometric measurement Å ³ (%) to a number of their atoms in standard geometric measurement of the original rock (second line)																
	SiO ₂ Si	Al ₂ O ₃ Al	K ₂ O K	Na ₂ O Na	CaO Ca	MgO Mg	FeO Fe ²⁺	Fe ₂ O ₃ Fe ³⁺	TiO ₂ Ti	P ₂ O ₅ P	MnO Mn	CO ₂ C	S*	H ₂ O ⁺ H	O	Σ (Δ)	
*	45–50	14–17	1–3	3–4	6–8	6–8	6–8	3–5	2–4	н/д						–	
1	42,57	17,37	1,29	1,98	10,1	6,15	6,80	4,12	1,96	0,57	0,14	0,63	0,10	4,14	–	97,92	
46	42,48 1,2	14,67 –14,3	3,54 178	2,21 13,2	9,28 –6,8	9,28 53,0	5,64 –15,7	3,18 –21,7	1,06 –45,2	0,46 –17,9	0,13 –5,9	3,64 486	0,17 72	1,75 –56,8	–0,3	97,49 (9,7)	
41	42,11 –2,1	16,95 –3,5	4,10 214	2,28 13,8	8,73 –14,5	8,67 39,4	5,51 –19,7	3,16 –24,1	1,05 –47,1	0,44 –23,9	0,13 –8,4	3,87 508	0,27 167	2,01 –52,0	–0,7	99,28 (9,9)	
31	43,06 –1,7	15,68 –12,3	3,80 186	2,82 38,3	9,01 –13,3	7,84 23,8	5,64 –19,3	3,04 –28,3	1,10 –45,5	0,44 –24,7	0,12 –16,8	3,80 486	0,21 104	1,68 –60,6	–3,8	98,24 (11,5)	

Примечание: 1) * – нормативный состав трахибазальта (умеренно щелочного долерита) [7]. 2) проба 1 – слабо гидротермально измененный (исходный) умеренно щелочной долерит; пробы 46, 41, 31 – гидротермально измененные умеренно щелочные долериты внутрирудных даек Зун-Холбинского месторождения. 3) S* – сера восстановленная. 4) Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества (суммы атомов петрогенных элементов) в процентах к массе вещества исходной породы в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³.

Note: 1) * is the norm of trachybasalt (moderate alkaline dolerite) [7]. 2) a sample of 1 is a slightly hydrothermally modified (original) moderate alkaline dolerite; the samples 46, 41, 31 are hydrothermally modified moderate alkaline dolerites of intra-ore dikes of Zun-Kholba deposit. 3) S* is reclaimed sulfur. 4) Δ is specific weight of displaced (supplied and set out) substance (sums of atoms of petrogenic elements) in % to the original rock substance weight in standard geometric measurement 10 000 Å³.

свойственных нормативному долериту. До 47,1 % от исходного снижено содержание титана, примерно до 20 % – железа, фосфора, до 60 % воды. Существенного перераспределения других петрогенных элементов не произошло.

Минералого-петрохимические черты внутрирудного аподолеритового метасоматизма в других гидротермальных золотых месторождениях

В Ленском районе известно не менее двух генераций даек основного состава, принадлежащих к позднепалеозойскому (312 ± 59 млн л [9]) кадали-бутуинскому комплексу: одна из них дожилая, другая послезильная [10, 11]. Возраст золотого оруденения здесь, образованного в позднерифейских толщах черных сланцев, 315 млн л [12].

Дожилые дайки рассекаются многочисленными кварцевыми прожилками, обладают реликтовой порфириковой структурой и содержат во вкраплениях плагиоклаза, оливина, пироксена агрегаты альбита, хлорита, магнезиально-железистых карбонатов, а в основной массе – те же минералы с примесью кварца и пирита. Магнезиально-железистые карбонаты и пирит аподайковых метасоматитов по морфологии, размерам кристаллов, составу, набору и содержанию элементов-примесей (серебра, свинца, цинка, висмута и др.) аутентичны тем, которые образованы в околорудных метасоматических ореолах сланцев.

Послежилые дайки пересекают кварцевые жилы, не содержат кварцевых прожилков, в контактах с кварцем сопровождаются зонами закалки

и наряду с исходными магматическими минералами – плагиоклазом (15 об. %), авгитом (30 об. %), гранатом, магнетитом, апатитом – содержат комплекс новообразованных минералов в составе зеленовато-бурого, грязно-зеленого биотита (до 40 об. %), амфибола, апатита, цоизита, кальцита, магнетита, хлорита, серицита и др. Биотит замещает амфибол, пироксен, лабрадор.

Эпигенетическое происхождение амфибола, биотита [11] и состав реликтовых минералов (оливин, авгит, лабрадор) указывают на первоначально долеритовый состав породы. Метасоматитам поздних даек свойственно значительное (вдвое-вчетверо) обогащение фосфором, магнием сравнительно с нормативным составом габбро, долеритов. Фемический профиль гидротермальных изменений даек (фосфор, магний, отчасти титан) коррелирует, как и в Кедровском месторождении, с фемической специализацией околорудных апосланцевых метасоматических ореолов и руд – насыщением крупнообъемных околорудных ореолов магнием [13], околожилых березитов, березитоидов сульфидоносных зон и пирита в них титаном [14, 15], фосфором, причем последним в составе апатита обогащены и продуктивные кварцевые жилы [16]. Такими дайками («лампрофирами», по А.В. Синцову) насыщены оперяющие контролирующий месторождение Сухой Лог Кадали-Сухоложский разлом структуры [17].

С усилением степени изменений даек в аподайковых метасоматитах увеличивается содержание золота – от 1,3 мг/т (21 проба) в слабо измененных

разностях до 11 мг/т (22 пробы) в сильно измененных [11]. Поскольку продуктивная сульфидная прожилково-вкрапленная минерализация района связана с кварцево-жильной генетическим единством в рамках одного рудообразующего процесса [18–20], постольку следует рассматривать описанные дайки как дорудные (ранние пропицитизированные) и внутрирудные или позднерудные (амфиболитизированные и биотитизированные).

В золоторудном месторождении Чертово Корыто, расположенном на севере Патомского нагорья [2. Рис. 1] в составе Артемьевского рудного поля, в залежах метасоматитов пропицит-березитового профиля с жильно-прожилково-вкрапленной сульфидно-кварцевой минерализацией среди терригенных углеродистых сланцев раннепротерозойской михайловской свиты встречены дайки пропицитизированных диоритов и диоритовых порфиритов мощностью до 20 м и подобные описанным кедровским, зун-холбинским, ленским дайками долеритов протяженностью до 1 км. Те и другие представляют средние и поздние производные антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-магматических комплексов [5].

По данным М.М. Баженова с соавторами (устное сообщение В.Г. Мартыненко) диориты и диоритовые порфириты имеют сланцеватую текстуру, реликтовую призматически зернистую структуру. В порфировых разновидностях присутствуют крупные таблитчатые кристаллы деанортитизированного в разной степени до альбита плагиоклаза, замещенного в смеси с альбитом клиноцоизитом и карбонатом. Цветные минералы исходной породы замещены хлоритом, последний – серицитом, кварцем, рутилом, лейкоксеном.

Среди долеритов различаются гидротермально измененные и менее (слабо) измененные. Последние наблюдаются внутри пластовых интрузий и в мелких телах, сложенных мелкозернистыми породами. Мелко-среднезернистые долериты первой совокупности – это массивные породы, сохранившие реликтовую офитовую структуру, фрагменты которой образованы беспорядочно ориентированными лейстовидными и таблитчатыми кристаллами плагиоклаза, замещенными в разной степени альбит-эпидот-серицитовыми агрегатами. Альбит замещен обыкновенной роговой обманкой, актинолитом (в сумме 30...65 об. %), последние – частично хлоритом и серицитом. В составе минеральных новообразований участвуют также клиноцоизит-эпидот, альбит (15...40 об. %), биотит (до 15 об. %). Породы содержат золото до 3 г/т.

Как дорудные и внутрирудные квалифицированы послегранитные дайки долеритов в ряде золоторудных месторождений Кузнецкого Алатау, а в оклорудных геохимических ореолах отмечены аномалии ванадия и титана [21]. В частности, в Беркульском кварцево-жильном месторождении среди покровных базальтов, андезибазальтов беркульской свиты среднего кембрия диагностированы две генерации дорудных, одна (?) генерация

внутрирудных, две генерации послерудных (позднерудных) даек долеритов [22]. Внутрирудные долериты преобразованы в метасоматиты среди менее измененных вмещающих базальтоидов.

В Ангаро-Канском архейском гранито-гнейсовом выступе фундамента известные золотые месторождения – Кузеевское и другие, образованные в процессе позднерифейской тектоно-магматической активизации, контролируются Енисейским глубинным разломом. В месторождениях резко возрастает количество даек габбро-долеритов, в числе которых присутствуют две дорудные и две послерудные генерации [23]. Базитовым дайкам предшествуют кислые изверженные породы – дайки гранит-порфиров.

Биотитизированные, окварцованные, альбитизированные, карбонатизированные дайки основных пород, непосредственно сменявшие во времени рудовмещающие гранитоиды, отмечены в известных уральских месторождениях золота – Березовском, Кочкарском и других [24]. Кочкарские интенсивно биотитизированные дайки, большую часть объема которых занимает новообразованный биотит, получили собственное название «табашки».

В одном из золоторудных месторождений Казахстана в девонском гранодиоритовом массиве сопровождаемые березитами умеренно сульфидные золоторудные кварцевые жилы и зоны прожилково-вкрапленных руд наложены на послегранитные дайки диоритовых порфиритов, лампрофиров, пересечены внутрирудными дайками вариолитов, которые вмещают позднюю продуктивную золото-сульфосольную минерализацию [25].

Пространственно-временные связи золотого оруденения с производными основного магматизма существуют в зеленокаменных трогах архейского фундамента древних платформ [26, 27]. Околорудные метасоматиты локализованных здесь древних (поздний архей – ранний протерозой) золоторудных месторождений принадлежат листовит-березитовой формации и в тыловой зоне состоят, как и в более молодых месторождениях, из серицита, кварца, магнезиально-железистых карбонатов, пирита [28, 29]. В раннепротерозойском (2140...2240 ± 70 млн л) рудном поле Колар, например, рудоконтролирующие зоны вмещают дорудные и внутрирудные дайки долеритов [30, 31], а рудные кварцы обогащены (до сотых долей %) хромом и титаном [32]. Повышенные концентрации хрома и титана обнаружены в рудных залежах другого рудного поля кратона Карнатака – Мангалуру [33].

Обсуждение результатов и выводы

Обнаружение в гидротермальных месторождениях золота послегранитных и последиоритовых дорудных, дорудных и внутрирудных, дорудных, внутрирудных и послерудных в разных сочетаниях даек базитов при условии интереса к ним и целенаправленного их поиска зависит от ряда фак-

торов: различной доступности месторождений для изучения вблизи дневной поверхности и на глубоких горизонтах, разных объемов магматических камер – источников базальтовых расплавов, особенностей подъема расплавов в образующиеся месторождения и/или консервации и кристаллизации их в основном в рудоконтролирующих глубинных разломах на периферии месторождений вследствие меньшей проникающей способности вязких расплавов в оперяющие структуры сравнительно с металлоносными растворами. Причинно-следственные связи поздних даек базитов в перечисленных наборах с плутонами, массивами, ассоциациями даек ранних гранитоидов, зрелыми ультраметаморфическими очагово-купольными постройками подчеркиваются пространственно-временной по меркам геологического времени в первые миллионы ... первые десятки млн л близостью их и образованием кислых магматических пород посредством палингенеза под воздействием ранних безрудных высокотемпературных флюидов-теплоносителей, генерированных в мантии или в более глубинных оболочках планеты. Последнее доказывается $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – изотопной системой гранитоидов [3–5, 24 и др.].

Весь ансамбль ранних и поздних магматических производных, повторяющийся в разные геологические эпохи в Енисейском (поздний рифей), Кузнецко-Алатаусском (ранний палеозой), Окино-Китойском (средний палеозой), Муйском, Ленском (поздний палеозой) и других золоторудных районах объединяется в антидромные гранит-диорит-долеритовые флюидно-магматические комплексы, а участие в их составе гидротермального золотого оруденения сообщает им статус флюидно-рудно-магматических. В свою очередь, становление таких комплексов независимо от времени и пространства обеспечивает их трансформацию в региональные флюидно-рудно-магматические формации и формационный тип.

В детально изученных в рамках обсуждаемой проблемы Центральном, Берикульском, Зун-Холбинском, Западном, Кедровском, Ирокиндинском, Богодиканском, Каралонском, Уряхском, Верхне-Сакуканском месторождениях южного горноскладчатого обрамления Сибирского кратона поздние дайки умеренно щелочных долеритов, в том числе и прежде всего послегранитные дорудные, обладают стабильным минералого-химическим составом, отвечающим нормативному для данного типа пород [3, 5, 7, 34]. Об этом свидетельствует состав долеритов в «останцах» слабого изменения, сохранившихся в наиболее мощных дайках при околорудных метасоматических преобразованиях пород. В перечисленных месторождениях кроме долеритов присутствуют только дорудные дайки предшествующих долеритам ранних диоритоидов и гранитоидов – аплитовидных и пегматоидных гранитов, гранит-порфиров, фельзитовых микрогранит-порфиров, микродиоритов, диоритовых порфиров в разных сочетаниях.

Поскольку пути подъема ранних мантийных, обуславливающих образование палингенных гранитоидов, флюидов-теплоносителей и базальтовых расплавов совпадают – одни и те же глубинные разломы, следует ожидать смешение в разных пропорциях палингенных кислых и поступавших из мантии основных расплавов и, как следствие, «пестрый» состав даек, многообразие видов и разновидностей дайковых пород. Смешение не происходило даже в тех случаях, когда месторождения с их базитовыми дайками образованы в массивах ранних палингенных гранитоидов, очевидно, по причине полной кристаллизации к моменту внедрения ранних порций базальтовых расплавов кислых магм. Отсюда следует, что металлоносные растворы, в том числе их ранние порции, поступавшие после ранних порций базальтовых расплавов, не могли быть генерированы в кислых магмах, которых уже не существовало. Генетическая связь оруденения с гранитами маловероятна и в тех месторождениях, в которых зафиксировано видовое разнообразие дайковых пород как следствие смешения расплавов контрастных составов, поскольку металлоносные растворы формируются и без участия гранитоидных очагов.

Образование в составе поздней дайковой ассоциации магматических комплексов внутрирудных даек умеренно щелочных долеритов, наряду с дорудными и послерудными, в режиме чередующегося внедрения расплавов и металлоносных растворов доказывает функционирование рудообразующих систем в условиях и в периоды высокой магматической активности мантии, сопровождаемой дифференциацией базальтовых расплавов в направлении повышения их щелочности. В свою очередь, преобразование долеритов в объемах внутрирудных даек в метасоматиты среди сохраняющихся свежими или ранее в разной степени гидротермально измененными вмещающих пород есть признак флюидопроводящей функции даек, которая им свойственна согласно известному физическому эффекту [35, 36] только в горячем состоянии при залегании среди относительно холодных пород.

Квалификация внутрирудных даек как тепловых флюидопроводников опирается на следующие факты. Большинство даек выполняет трещины отрыва с характерными коленообразными изгибами их стенок. Выступам в одних контактах даек по размерам и конфигурации соответствуют выемки в противоположных контактах. Это свидетельствует об отсутствии скольжения боков вмещающих дайки трещин, в том числе после застывания расплавов. Не только аподолеритовые метасоматиты, но и слабо измененные долериты в останцах наиболее мощных даек сохранили массивное сложение и «сваренные» контакты с вмещающими породами. Все это означает, что после образования даек не происходило дробление пород и, как следствие, возрастание их проницаемости, а метасоматические преобразования долеритов осуществлялись в

условиях фильтрации растворов по поровому пространству пород.

Гидротермально-метасоматическое происхождение большинства эпигенетических минералов, слагающих аподолеритовые метасоматиты, определяется их видовой принадлежностью – они не кристаллизуются в расплавах, но представляют минеральные производные метаморфических и метасоматических процессов. Исключения составляют биотит и обыкновенная роговая обманка. Однако содержание биотита в основных магматических породах как минерала позднемагматического этапа не превышает 5 об. % [7] вследствие дефицита в базальтовых расплавах калия, при том что содержание его в обсуждаемых метасоматитах достигает многих десятков процентов. Эпигенетическое образование обоих минералов доказывается также тем, что они ассоциируют с другими метасоматическими минералами и отсутствуют там, где долериты слабо изменены.

Оба минерала относятся к числу наиболее высокотемпературных и в аподолеритовых метасоматитах присутствуют не всегда. Очевидно, они не образуются в тех случаях, когда температуры еще горячих даек и фильтрующихся по дайкам растворов снизились до уровней, недостаточных для кристаллизации этих минералов. Вместе с тем образование высокотемпературного биотита после относительно низкотемпературных минералов пропилитовой ассоциации обусловлено сохранением высокой температуры наиболее поздней порции растворов после отделения от расплавов при подъеме по горячим дайкам.

Между ранними аподолеритовыми в дайках и более поздними околорудными метасоматитами – соответственно пропилитами и березитами – существует преемственность – унаследованность, которая выражается в следующем.

Те и другие метасоматиты образуются в условиях калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма с поступлением и фиксацией калия в биотите аподолеритовых метасоматитов и в более низкотемпературном сериците околорудных березитов, серы – в пирите и углекислоты – в карбонатах (табл. 5) [4, 5].

Повышенные, за редким исключением из закономерности, вплоть до аномальных содержания профильных Au, Ag, цветных металлов и ассоциации фемофильных элементов Ti, P, Mg, Fe в аподолеритовых метасоматитах сопровождаются высококонтрастными аномалиями Au, Ag, а в ближнем обрамлении глубинных разломов и перечисленных фемофильных элементов [37] – в околорудных березитах и рудах. Последнее свидетельствует о металлоносности поднимавшихся по дайкам растворов. В свою очередь, ассоциация фемофильных элементов, определяющих петрохимическое своеобразие базитовых магм, есть прямое указание на генерацию металлоносных растворов в очагах базальтовых расплавов, которым свойствен щелочной режим. Вещественным выражением

реального взаимодействия с долеритами щелочных специализированных по калию, магнию, железу, кальцию и другим упомянутым элементам растворов, очевидно, в раннюю щелочную стадию (по Д.С. Коржинскому) в верхнем интрузивном–надинтрузивном пространстве служит в аподолеритовых метасоматитах биотит в ассоциации с незначительной примесью новообразованной обыкновенной роговой обманки.

Учитывая приведенные факты, подтверждающие ранее сделанные выводы [3–5], следует считать, что образующие мезотермальные месторождения золота металлоносные растворы генерируются в очагах умеренно щелочных базальтовых расплавов, поднимаются в верхние горизонты земной коры до уровней залегания создающих физико-химические барьеры грунтовых вод струями по разломам и горячим дайкам вслед за базальтовыми расплавами через промежутки времени, в течение которых дайки долеритов не успевают остыть и утрачивают флюидопроводящую функцию.

Согласно полученным результатам, мезотермальные месторождения золота принадлежат [3–5] к золотопроизводящим антидромным гранит-диорит-долеритовым флюидно-рудно-магматическим комплексам и образуются в кристаллическом и черносланцевом субстрате по одному написанному природой сценарию на позднем базальтоидном этапе их эволюции.

Замена популярного до семидесятых годов прошлого века представления о металлогенической специализации гранитоидных магматических комплексов на представление об их потенциальной рудоносности [38] осуществлялась вследствие накопления множества противоречивых геохимических данных о содержаниях (нижекларковых, сверхкларковых) ряда металлов, в том числе золота, в разных массивах гранитоидов, включая поздние дифференциаты гранитной магмы [39–41]. Анализ и обобщение этих данных сопровождались выводом о невозможности использования их для доказательства рудогенерирующей способности гранитных расплавов. Этот вывод послужил импульсом к углублению и расширению исследовательского термодинамических и физико-химических режимов функционирования в магматических камерах гранитных расплавов на предмет оценки их рудопроизводящей способности [42–47].

Между тем приведенные выше факты доказывают всего лишь парагенетическую связь рудообразования с гранитным магматизмом, то есть опосредованное отношение месторождений золота к ранним гранитоидам в составе антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-рудно-магматических комплексов.

Поскольку последние повторяются во времени и пространстве, и не только в золоторудных районах южного горно-складчатого обрамления Сибирской платформы разного возраста и геологического строения, но, по ряду признаков, и в других золоторудных районах планеты, следует вернуться к

представлению о существовании явления металлогенической специализации магматических комплексов (формационных типов), возможно, не только в приложении к золоту. Ранее обращалось внимание на аутентичную ситуацию, раскрывающую связи с подобными комплексами мезотермальных месторождений олова, вольфрама, полиметаллических руд в ассоциации со скарнами, грейзенами, в том числе с пропилит-березитовым сопровождением [48].

Вероятно, правы были С.С. Смирнов и Ю.А. Библин, считавшие магматические серии (комплексы) специализированными на совокупности видов

полезных ископаемых [49, 50]. Очень может быть, что гидротермальные месторождения металлических полезных ископаемых не составляют исключения из сообщества эндогенных месторождений, магматические представители которого – месторождения железа-титана-ванадия, нефелин-апатитовых, редкоземельно-редкометалльных, хром-платиноидных, медно-никелевых руд, алмазов, обязаны своим образованием специализированным на них магматическим комплексам.

Автор выражает благодарность Е.А. Вагиной, выполнившей фотографирование шлифов горных пород, и Т.А. Сыресиной, подготовившей статью к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев Х.М. Дайки и оруденение. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 232 с.
2. Кучеренко И.В. Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Ч. 1. Кедровское месторождение (Северное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 155–165.
3. Кучеренко И.В. Пространственно-временные и петрохимические критерии связи образования золотого оруденения с глубинным магматизмом // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1990. – № 10. – С. 78–91.
4. Кучеренко И.В. Концепция мезотермального рудообразования в золоторудных районах складчатых сооружений Южной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 182–197.
5. Кучеренко И.В. Металлогения золота: приложение к мезотермальным месторождениям, образованным в несланцевом и черносланцевом субстрате горно-складчатых сооружений южной Сибири // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Матер. Междунар. конф., посвящ. 80-летию основания в Томском политехническом университете первой в азиатской части России кафедры «Разведочное дело». – Томск, 5–8 октября 2010 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 241–256.
6. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы / под ред. В.П. Петрова. – М.: Мир, 1965. – 406 с.
7. Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / под ред. О.А. Богатинова, О.В. Петрова, Л.Н. Шарпенка. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
8. Минералы. Справочник / под ред. Ф.В. Чухрова, Э.М. Бонштедт-Куплетской. – Т. III. – Вып. 3. – М.: Наука, 1981. – 398 с.
9. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова и др. // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
10. Шер С.Д. Жильные изверженные породы основного состава в бассейне р. Бодайбо и их соотношения с кварцевыми жилами // Труды Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института. – 1959. – Вып. 4. – С. 104–114.
11. Кондратенко А.К., Шер С.Д. Метасоматические изменения жильных пород в Ленской золотоносной области и их возможное значение с точки зрения золотоносности // Вопросы геологии месторождений золота и золотоносных районов. – М.: ЦНИГРИ, 1968. – С. 312–314.
12. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог / Н.П. Лаверов, В.Ю. Прокофьев., В.В. Дистлер др. // Доклады РАН. – 2000. – Т. 371. – № 1. – С. 88–92.
13. Буряк В.А., Львова Н.А. О генезисе магнезиально-железистых карбонатов Ленского золотоносного района // Эндогенное оруденение Прибайкалья. – М.: Наука, 1969. – С. 46–62.
14. Ленский золотоносный район (стратиграфия, тектоника, магматизм и проявления коренной золотоносности) / Ю.П. Казакевич, С.Д. Шер, Т.П. Жаднова и др. // Труды Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института. – 1971. – Вып. 85. – 164 с.
15. Шаров В.Н., Шмотов А.Н., Коновалов И.В. Метасоматическая зональность и связь с ней оруденения. – Новосибирск: Наука, 1978. – 103 с.
16. Намолов Е.А., Чиркова В.М. Топоморфные ассоциации и региональная минеральная зональность золото-кварцевых жил Бодайбинского рудного поля // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири: Тезисы докладов региональной науч. конф. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 1986. – С. 62–63.
17. Синцов А.В. Роль Кадали-Сухоложского разлома в размещении золотого оруденения (Ленский золотоносный район) // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 218. – № 4. – С. 916–918.
18. Поликарпочкин В.В., Гапон А.Е., Шергин Б.В. Проблема источников рудного вещества в Ленском золотоносном районе // Проблемы геохимии эндогенных процессов. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 153–162.
19. Распределение летучих компонентов в золоте, сульфидах и кварце рудных зон Ленской провинции / В.В. Левицкий, Б.Г. Демин, Е.А. Намолов и др. // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 249. – № 6. – С. 1447–1449.
20. Металлогеническое районирование, критерии прогноза и модель формирования золотого оруденения одного из рудных районов Восточной Сибири / В.В. Коткин, А.Л. Александров, Н.В. Сизых и др. // Геология и полезные ископаемые юга Восточной Сибири: Тезисы докладов Всесоюзной конф. – Иркутск, 1984. – С. 63–66.
21. Гундобин Г.М., Зубков В.С. Геохимические черты золоторудных флюидно-магматических систем юго-восточной части Кузнецкого Алатау // Геология и геофизика. – 1988. – № 3. – С. 70–78.
22. Кучеренко И.В., Грибанов А.П. Взаимоотношения дайковых образований с золоторудными кварцевыми жилами в Бериккульском рудном поле // Известия Томского политехнического института. – 1968. – Т. 134. – С. 153–158.
23. Ли Л.В. О связи эндогенного оруденения с процессами тектономагматической активизации в Ангаро-Канской глыбе // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 263. – № 3. – С. 676–679.
24. Золотоносные габбро-тоналит-гранодиорит-гранитные массивы Урала: возраст, геохимия, особенности магматической и рудной эволюции / Г.Б. Ферштатер, В.В. Холоднов, А.А. Кременецкий, А.А. Краснобаев, Н.С. Бородина, Е.А. Зинькова, С.В. Прибавкин // Геология рудных месторождений. – 2010. – Т. 32. – № 1. – С. 65–84.

25. Поречин А.А., Данилов В.И., Тайлаков А.М. Условия размещения и возрастные соотношения оруденения и магматизма в одном из золоторудных районов Казахстана // Геологическое строение и полезные ископаемые Южного Казахстана. – Алмата: КазИМС, 1986. – С. 127–134.
26. Lamprophyres as potential gold exploration targets: some preliminary observations and speculations / N.M.S. Rock, P. Duller, R.S. Hasmeldine et al. // Recent Advances in understanding Precambrian gold deposits. – Adelaide: University West Australia, 1987. – P. 271–286.
27. Wyman D., Kerrich R. Alkaline magmatism, major structures and gold deposits: Implications for greenstone belt gold metallogeny // Economic Geology. – 1988. – V. 83. – № 2. – P. 454–461.
28. Bertram G.D., McCall G.J.H. Wall-rock alteration associated with auriferous lodes in the Golden Mile, Kalgoorlie // Geological Society of Australia. Spec. Publ. – 1971. – № 3. – P. 191–200.
29. Goldind S.D., Welson A.F. Geochemical and stable isotope studies of the No. 4 Lode, Kalgoorlie, Western Australia // Economic Geology. – 1983. – V. 78. – № 3. – P. 438–458.
30. Сафонов Ю.Г., Рао Кришна Б., Васудев В.Н. Геологическая позиция и геолого-структурные особенности золоторудных и медных месторождений кратона Карнатака, Индия // Геология и полезные ископаемые древних платформ. – М.: Наука, 1984. – С. 64–81.
31. Источники рудного вещества отдельных групп эндогенных месторождений. Золоторудные месторождения / В.А. Коваленко, Ю.Г. Сафонов, И.В. Чернышов и др. // Эндогенные источники рудного вещества. – М.: Наука, 1987. – С. 187–199.
32. Новые данные по минералогии и геохимии золоторудного поля Колар, Индия / А.Д. Генкин, Ю.Г. Сафонов, В.А. Боронихин и др. // Геология и полезные ископаемые древних платформ. – М.: Наука, 1984. – С. 83–89.
33. Ugarkar A.G., Tenginkai S.G. Gold-quartz sulphide reefs of Mangaluru, Gulbarga district, Karnataka // Current Science. – 1988. – V. 57. – № 3. – P. 143–145.
34. Кучеренко И.В. Петрологические и металлогенические следствия изучения малых интрузий в мезотермальных золоторудных полях // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 49–57.
35. Поспелов Г.Л. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников // Геология и геофизика. – 1963. – № 3. – С. 18–19.
36. Рундквист Д.В. О влиянии распределения температур горных пород на процессы метасоматического гидротермального минералообразования // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1966. – Ч. 95. – Вып. 5. – С. 509–525.
37. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep // International Journal of applied and fundamental research. – 2011. – № 1. – P. 37–43.
38. Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. – М.: Наука, 1977. – 267 с.
39. Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Коваль В.В. Геохимические типы мезозойских гранитоидов Монголии и их металлогения // Закономерности размещения полезных ископаемых. – М.: Наука, 1975. – Т. XI. – С. 329–334.
40. Шилин Н.Л., Кумеев С.С., Колосков А.В. Золото в калиевых полевых шпатах из интрузивных и метасоматических образований // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1988. – № 10. – С. 93–101.
41. Амузинский В.А. Геохимические особенности распределения золота в магматических породах Верхоянской антиклинальной зоны // Минералогия и геохимия производных гранитоидного магматизма. – Якутск: Институт геологии Якутского филиала СО АН СССР, 1981. – С. 89–98.
42. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующего магматизма. – М.: Изд-во РАЕ, 2012. – 160 с.
43. Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems // Economic Geology. – 2006. – V. 101. – № 7. – P. 1415–1427.
44. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding // Mineral Deposita. – 2001. – V. 36. – P. 477–489.
45. Plutonic-Related Gold Deposits of Interior Alaska / D. MacCoy, R.J. Newberry, P.D. Layer, J.J. Marchi, A. Bakke, J.S. Mastermann, D.L. Minehane // Economic Geology. – 1997. – V. 9. – P. 191–241.
46. Mustard R. Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales // Mineral Deposita. – 2001. – V. 36. – P. 542–562.
47. Yang X.M., Lentz D.R., Sylvester P.J. Gold contents of sulfide minerals in granitoids from southwestern New Branswick, Canada // Mineral Deposita. – 2006. – V. 41. – P. 369–386.
48. Кучеренко И.В. Реконструкция золотопродуцирующей способности силикатных расплавов как основа петрологического и петрохимического прогнозно-поисковых критериев оценки территорий на золото // Золото и технологии. – 2013. – № 2 (20). – С. 70–80.
49. Смирнов С.С. О современном состоянии теории образования магматогенных рудных месторождений // Записки Всесоюзного минералогического общества. Вторая серия. – 1947. – Ч. 76. – Вып. 1. – С. 23–36.
50. Билибин Ю.А. Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. – М.: Госгеолтехиздат, 1955. – 87 с.

Поступила 02.09.2013 г.

UDC 553.411.071:553.241.1:[552.313+552.333.4]

PETROLOGY OF HYDROTHERMAL METASOMATISM INTO INTRA-ORE DOLERITE DIKES OF MESOTHERMAL GOLD DEPOSITS. P. 2. ZUN-KHOLBA (EAST SAYAN)

Igor V. Kucherenko,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: Kucherenko.o@sibmail.com

The relevance of the research is caused by the necessity of working up the geology-genetic theory of hydrothermal gold deposits formation instead of the four hypotheses granitogene, basaltogene, metamorphogene, polygene excepting one another.

The main aim of the study is to substantiate the gold-isolating faculty of basaltic magmatism – the geologic process causing and ensuring ore-formation.

The methods used in the study: petrologic investigation of magmatism and accompanying metasomatism fractions by means of empiric observations in gold-ore deposits of the spatially-temporary correlations of magmatic, metasomatic rocks and ore-mineral complexes, minerals diagnostics applying electronic microscope with roentgen-spectrum analysis, balance petro-chemical calculations of total chemical silicate analysis of rocks for estimation of petrogenic elements and metals migration in metasomatic processes of ore-forming stages.

The results. It was established that after-granitic intra-ore dikes, discovered in Zun-Kholba deposit, – the thermal fluid-conductors of the moderate alkaline dolerites, as in Kedrovskoye deposit, bed in the middle of weakly alternated granitoids of Ambartogol massif and other rocks but they were transformed into metasomatites formed by biotite (to 60 vol. per cent) accompanied by Mg-Fe-common hornblende, antigorite, chlorite, sericite, quartz, carbonates, rutile, leucocoxene, pyrite in various ratio. The author distinguished biotite of early generation partially substituted for enumerated minerals and fresh biotite of the late generation, its scales edge completely the substituted crystals of former augite. Formation of late biotite after deposit of comparatively low-temperature chlorite and other metasomatic minerals is evaluated as the argument of pulsation regime of metal-bearing fluids entrance peculiar to ore-mineral complexes deposition in ore bodies. By means of balance calculations the potassium-sulphureously-carbon dioxide type of the within-dike metasomatism succeeded by the near-ore metasomatism was determined on the ways of the metal-bearing fluids hoisting with introducing and fixation in metasomatites of potassium, magnesium (to 50 wt. per cent), oxygenated carbon (to 500 wt. per cent), reduced sulfur (to 160 wt. per cent), in other deposits – titanium, phosphorus, calcium, manganese, gold, silver. So long as dolerite dikes can realize the fluid-conducting function according to the well-known physical effect only in hot condition among cold rocks, the metal-bearing fluids ascended within dikes following basaltic melts on those deep faults in the period when dikes remained hot. Similar intra-ore dikes-fluid-conductors of the moderate alkaline dolerites, transformed in metasomatites, are known in other mesothermal gold deposits located in crystalline substratum and black-shales series – Sukhoi Log, Chertovo Koryto, Kedrovskoe, Uryahskoe, Berikulskoe, Beriozovskoe, Kochkarskoe. In combination with granitoid solids and more late dioritoids they form the magmatic complexes, repeating in time and space. On the strength of all the evidences the author proved mesothermal gold mineralization formation in crystalline substratum and black-shale series at the final basaltoid stage of formation of antidromic granite-diorite-doleritic magmatic complexes, acquiring the status gold-isolating fluid-ore-magmatic complexes.

Key words:

Mesothermal gold deposits, petrology, hydrothermal metasomatism, intraore dolerite dikes, hot fluid-conductors, fluid-ore-magmatic complexes.

The author gives thanks to E.A. Vagina for rock sections photos and to T.A. Syresina for editing the paper.

REFERENCES

1. Abdullaev H.M. *Dayki i orudnenie* [Dikes and mineralization]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1957. 232 p.
2. Kucherenko I.V. Petrologiya gidrotermalnogo metasomatizma doleritov vnutrirudnykh daek mezotermalnykh mestorozhdeniy zolota. Ch. 1. Kedrovskoe mestorozhdenie (Severnoe Zabaykalye) [Petrology of hydrothermal metasomatism of intra-ore dolerite dikes of mesothermal gold deposits. P. 1. Kedrovskoe deposit (North Trans-Baikal)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 155–165.
3. Kucherenko I.V. Prostranstvenno-vremennye i petrokhimicheskie kriterii svyazi obrazovaniya zolotogo orudneniya s glubinyim magmatizmom [Spatially-temporal and petrochemical criteria of connection of gold mineralization formation with abyssal magmatism]. *Bulletin of the AS USSR. Series geological*, 1990, no. 10, pp. 78–91.
4. Kucherenko I.V. Kontseptsiya mezotermalnogo rudoobrazovaniya v zolotorudnykh rayonakh skladchatykh sooruzheniy Yuzhnoy Sibiri [Conception of mesothermal ore-formation in the gold-ore regions of the folded structures of South Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2001, vol. 304, no. 1, pp. 182–197.
5. Kucherenko I.V. Metallogeniya zolota: prilozhenie k mezotermalnym mestorozhdeniyam, obrazovannym v neslantsevom i chernoslantsevom substrate gorno-skladchatykh sooruzheniy yuzhnoy Sibiri [Gold Metallogeny: application to mesothermal deposits formed in non-shales and black-shales substratum of the mountain-folded structures of South Siberia]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennyye problemy geologii i razvedki poleznykh iskopaemykh»* [Proc. Int. conf. Contemporary problems of industrial minerals geology and exploration]. Tomsk, TPU Publ., 2010. pp. 241–256.
6. Dir U.A., Haul R.A., Zusman Dzh. *Porodoobrazuyushchie mineraly* [Rock-forming minerals]. Ed. V.P. Petrov. Moscow, Mir Publ., 1965. 406 p.
7. *Petrografichesky kodeks. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* [Petrographic code. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. Ed. by O.A. Bogatkov, O.V. Petrov, L.N. Sharpenok. St-Petersburg, VGI Publ., 2008. 200 p.
8. *Mineraly. Spravochnik* [Minerals. Reference book]. Ed. by F.V. Chukhrov. Moscow, Nauka Publ., 1981. Vol. III, no. 3, 398 p.

9. Rundkvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N. Etapy formirovaniya Bodaybinskogo zolotorudnogo rayona [Stages of the Bodaibinskii gold-ore region formation]. *Geology of the ore deposits*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15.
10. Sher S.D. *Zhilnye izverzhennyye porody osnovnogo sostava v bassejnye r. Bodaybo i ikh sootnosheniya s kvartsevymi zhilami* [Vein igneous rocks of basic composition in the ornamental water Bodaibo river and their correlations with quartz veins]. Moscow, CRGPI Publ., 1959. No. 4, pp. 104–114.
11. Kondratenko A.K., Sher S.D. Metasomaticheskie izmeneniya zhilnykh porod v Lenskoy zolotonosnoy oblasti i ikh vozmozhnoe znachenie s tochki zreniya zolotonosnosti [Metasomatic alterations of the vein rocks in Lenskii gold-bearing region and their possible importance with point of view of gold content]. *Voprosy geologii mestorozhdeniy zolota i zolotonosnykh rayonov* [Issues of geology of gold deposits and gold-bearing regions]. Moscow, CRGPI Publ., 1968, pp. 312–314.
12. Laverov N.P., Prokofev V.Yu., Distler V.V. Novye dannye ob usloviyakh rudootlozheniya i sostave rudoobrazuyushchikh flyuidov zoloto-platinovogo mestorozhdeniya Sukhoy Log [New data on ore-formation condition and composition of ore-forming fluids of gold-platinum Sukhoy Log deposit]. *Doklady RAN*, 2000, vol. 371, no. 1, pp. 88–92.
13. Buryak V.A., Lvova N.A. O genezise magnezialno-zhelezistykh karbonatov Lenskogo zolotonosnogo rayona [On genesis of magnesium-iron carbonates in Lenskii gold-bearing region]. *Endogennoe orudnenie Pribaykalya* [Endogenic mineralization in Baikal region]. Moscow, Nauka Publ., 1969. pp. 46–62.
14. Kazakevich Yu.P., Sher S.D., Zhadnova T.P. *Lenskiy zolotonosnyy rayon (stratigrafiya, tektonika, magmatizm i proyavleniya korennoy zolotonosnosti)* [Lenskii gold-bearing region (stratigraphy, tectonics, magmatism and original presence of gold showing)]. Moscow, CRGPI Publ., 1971. Vol. 85, 164 p.
15. Sharov V.N., Shmotov A.N., Kononov I.V. *Metasomaticheskaya zonalnost i svyaz s ney orudneniya* [Metasomatic zoning and causal relationship with mineralization]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 103 p.
16. Namolov E.A., Chirkova V.M. Topomorfnye assotsiatsii i regionalnaya mineralnaya zonalnost zolotokvartsevnykh zhil Bodaybinskogo rudnogo polya [Tipomorphic associations and regional mineral zoning of the gold-quartz lodes of Bodaibinsk ore deposit]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Vostochnoy Sibiri: Tezisy dokladov regionalnoy nauchnoy konferentsii* [Proc. Regional conf. Geology and industrial minerals of East Siberia]. Irkutsk, ISI Publ., 1986. pp. 62–63.
17. Sintsov A.V. Rol Kadali-Sukholozhskogo razloma v razmeshchenii zolotogo orudneniya (Lenskiy zolotonosnyy rayon) [Role of the Kadali-Sukholozhsky fault in gold mineralization localization (Lenskii gold-bearing region)]. *Doklady AN SSSR*, 1974, vol. 218, no. 4, pp. 916–918.
18. Polikarpochkin V.V., Gapon A.E., Shergin B.V. Problema istochnikov rudnogo veshchestva v Lenskoy zolotonosnoy rayone [Problem of ore material sources in Lenskii gold-bearing region]. *Problemy geokhimii endogennykh protsessov* [Problems of geochemistry of endogenetic processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, pp. 153–162.
19. Levitskiy V.V., Demin B.G., Namolov E.A. Raspredelenie letuchikh komponentov v zolote, sulfidakh i kvartse rudnykh zon Lenskoy provintsii [Distribution of flying components in gold, sulphides and quartz of the ore zones of the Lenskaya province]. *Doklady AN SSSR*, 1979, vol. 249, no. 6, pp. 1447–1449.
20. Kotkin V.V., Aleksandrov A.L., Sizykh N.V. Metallogenicheskoe rayonirovanie, kriterii prognoza i model formirovaniya zolotogo orudneniya odnogo iz rudnykh rayonov Vostochnoy Sibiri [Metallogenic division into districts, forecast criterions and model of gold mineralization formation in one of ore region of East Siberia]. *Geologiya i poleznye iskopaemye yuga Vostochnoy Sibiri: tezisy dokladov Vsesoyuznoy konferentsii* [Proc. All Union conf. Geology and industrial minerals of South East Siberia]. Irkutsk, 1984. pp. 63–66.
21. Gundobin G.M., Zubkov V.S. Geokhimicheskie cherty zolotorudnykh flyuidno-magmaticheskikh sistem yugo-vostochnoy chasti Kuznetskogo Alatau [Geochemic traits of the gold fluid-magmatic systems of South-East part of Kuznetskii Alatau]. *Geology and geophysics*, 1988, no. 3, pp. 70–78.
22. Kucherenko I.V., Gribanov A.P. Vzaimootnosheniya daykovykh obrazovaniy s zolotorudnymi kvartsevymi zhilami v Berikul'skom rudnom pole [Interaction of dikes formations with gold-ore quartz veins in Bericul deposit]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1968, no. 134, pp. 153–158.
23. Li L.V. O svyazi endogennoy orudneniya s protsessami tektono-magmaticheskoy aktivizatsii v Angaro-Kanskoj glybe [On endogenous mineralization relation with tectonic-magmatic activation in Angaro-Kansk block]. *Doklady AN SSSR*, 1982, vol. 263, no. 3, pp. 676–679.
24. Fershtater G.B., Holodnov V.V., Kremenetskiy A.A., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Zinkova E.A., Pribavkin S.V. Zolotonosnye gabbro-tonalit-granodiorit-granitnye massivy Urala: vozrast, geokhimiya, osobennosti magmaticheskoy i rudnoy evolyutsii [Gold-bearing gabbro-tonalite-granodiorite-granitic massifs of Ural: age, geochemistry, features of magmatic and ore evolution]. *Geology of ore deposits*, 2010, vol. 32, no. 1, pp. 65–84.
25. Porechin A.A., Danilov V.I., Taylakov A.M. Usloviya razmeshcheniya i vozniknoveniya sootnosheniya orudneniya i magmatizma v odnom iz zolotorudnykh rayonov Kazakhstana [The conditions of placing and age correlation of mineralization and magmatism in one of gold-ore regions of Kazakhstan]. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Yuzhnogo Kazakhstana* [Geological structure and minerals of South Kazakhstan]. Alma-Ata, KazIMS Publ., 1986. pp. 127–134.
26. Rock N.M.S., Duller P., Hasmeldine R.S. Lamprophyres as potential gold exploration targets: some preliminary observations and speculations. *Resent Advances in understanding Precambrian gold deposits*. Adelaide, University West Australia, 1987. pp. 271–286.
27. Wyman D., Kerrich R. Alkaline magmatism, major structures and gold deposits: Implications for greenstone belt gold metallogeny. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, no. 2, pp. 454–461.
28. Bertram G.D., McCall G.J.H. Wall-rock alteration associated with auriferous lodes in the Golden Mile, Kalgoorlie. *Geological Society of Australia. Spec. Publ.*, 1971, no. 3, pp. 191–200.
29. Goldind S.D., Welson A.F. Geochemical and stable isotope studies of the No. 4 Lode, Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 1983, vol. 78, no. 3, pp. 438–458.
30. Safonov Yu.G., Rao Krishna B., Vasudev V.N. Geologicheskaya pozitsiya i geologo-strukturnye osobennosti zolotorudnykh i mednykh mestorozhdeniy kratona Karnataka, Indiya [Geological position and geologic-structural features of gold-ore and copper deposits of craton Karnataka, India]. *Geologiya i poleznye iskopaemye drevnykh platform* [Geology and minerals of ancient platforms]. Moscow, Nauka Publ., 1984. pp. 64–81.
31. Kovalenker V.A., Safonov Yu.G., Chernyshov I.V. Istochniki rudnogo veshchestva otdelnykh grupp endogennykh mestorozhdeniy. Zolotorudnye mestorozhdeniya [Sources of ore material of separate groups of endogenous deposits. Gold-ore deposits]. *Endogennye istochniki rudnogo veshchestva* [Endogenetic sources of ore substance]. Moscow, Nauka Publ., 1987. pp. 187–199.
32. Genkin A.D., Safonov Yu.G., Boronikhin V.A. Novye dannye po mineralogii i geokhimii zolotorudnogo polya Kolar, Indiya [New data on mineralogy and geochemistry of the gold-ore deposit Kolar, India]. *Geologiya i poleznye iskopaemye drevnykh platform* [Geology and minerals of ancient platforms]. Moscow, Nauka, 1984. pp. 83–89.
33. Ugarkar A.G., Tenginkai S.G. Gold-quartz sulphide reefs of Mangaluru, Gulbarga district, Karnataka. *Current Science*, 1988, vol. 57, no. 3, pp. 143–145.

34. Kucherenko I.V. Petrologicheskie i metallogenicheskie sledstviya izucheniya mal'kikh intruziy v mezotermalnykh zolotorudnykh pol'yakh [Petrologic and metallogenetic corollary of small intrusions investigation in the mesothermal gold-ore deposits]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 1, pp. 49–57.
35. Pospelov G.L. Geologicheskie predposylki k fizike rudokontroli-ruyushchikh flyuidoprovodnikov [Geological prerequisites to physics of ore-controlling fluid-conductors]. *Geology and geophysics*, 1963, no. 3, pp. 18–19.
36. Rundkvist D.V. O vliyaniy raspredeleniya temperatur gornykh porod na protsessy metasomaticheskogo gidrotermalnogo mineralobrazovaniya [On the influence of temperature rocks distribution on metasomatic hydrothermal mineral formation]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*, 1966, P. 95, no. 5, pp. 509–525.
37. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep. *International Journal of applied and fundamental research*, 2011, no. 1, pp. 37–43.
38. Tauson L.V. *Geokhimicheskie tipy i potentsialnaya rudonosnost granitoidov* [Geochemic types and potential ore-bearing of granitoids]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 267 p.
39. Kovalenko V.I., Kuzmin M.I., Koval V.V. Geokhimicheskie tipy mezozoyskikh granitoidov Mongolii i ikh metallogeniya [Geochemical types of Mesozoic granitoids of Mongolia and their metallogeny]. *Zakonomernosti razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh* [Laws of minerals distribution]. Moscow, Nauka Publ., 1975. No. XI, pp. 329–334.
40. Shilin N.L., Kumeev S.S., Koloskov A.V. Zoloto v kalievyykh polevykh shpatakh iz intruzivnykh i metasomaticheskikh obrazovaniy [Gold in common potash feldspars from intrusive and metasomatic formations]. *Bulletin of the AS USSR. Series geological*, 1988, no. 10, pp. 93–101.
41. Amuzinsky V.A. Geokhimicheskie osobennosti raspredeleniya zolota v magmaticheskikh porodakh Verkhoyanskoy antiklinal'noy zony [Geochemical features of gold distribution in magmatic rocks of the Verkhoyansk anticlinal zone]. *Mineralogiya i geokhimiya proizvodnykh granitoidnogo magmatizma* [Mineralogy and geochemistry of granitoid magmatism derivatives]. Yakutsk, Institut geologii Yakutskogo filiala SO AN SSSR, 1981. pp. 89–98.
42. Gusev A.I. *Petrologiya zolotogeneriruyushchego magmatizma* [Petrology of goldgenerating magmatism]. Moscow, RAS Publ., 2012. 160 p.
43. Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems. *Economic Geology*, 2006, vol. 101, no. 7, pp. 1415–1427.
44. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineral Deposita*, 2001, vol. 36, pp. 477–489.
45. MacCoy D., Newberry R.J., Layer P.D., Marchi J.J., Bakke A., Mastermann J.S., Minehane D.L. Plutonic-Related Gold Deposits of Interior Alaska. *Economic Geology*, 1977, vol. 9, pp. 191–241.
46. Mustard R. Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales. *Mineral Deposita*, 2001, vol. 36, no. 4, pp. 542–562.
47. Yang X.M., Lentz D.R., Sylvester P.J. Gold contents of sulfide minerals in granitoids from southwestern New Branswick, Canada. *Mineral Deposita*, 2006, vol. 41, pp. 369–386.
48. Kucherenko I.V. Rekonstruktsiya zolotoproduktivnykh sposobnosti silikatnykh rasplavov kak osnova petrologicheskogo i petrokhimicheskogo prognozno-poiskovykh kriteriev otsenki territoriy na zoloto [Reconstruction of the goldgenerating ability for silicate melts as the base of petrological and petrochemical prediction-search criteria of territories appraisal on gold]. *Zoloto i tekhnologii*, 2013, no. 2 (20), pp. 70–80.
49. Smirnov S.S. O sovremennom sostoyanii teorii obrazovaniya magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniy [On contemporary state of the theory of magmatogenous ore deposits origin]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. Vtoraya seriya, 1947, P. 76, Iss. 1, pp. 23–36.
50. Bilibin Yu.A. *Metallogenicheskie provintscii i metallogenicheskie epokhi* [Metallogenic provinces and metallogenic epochs]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1955. 87 p.

Received: 02 September 2013.

УДК 553.43.+411.+44

ПЕРСПЕКТИВЫ КАСКЫРКАЗГАН-КАРАТАССКОЙ ЗОНЫ НА ВЫЯВЛЕНИЕ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ, ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ, ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ И ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАЗАХСТАН)

Акылбеков Сиязбек Аманбекович,

д-р геол.-минерал. наук, академик Международной академии минеральных ресурсов, академик Российской академии естественных наук, руководитель аналитического отдела ТОО «АТМ Консалтинг», Республика Казахстан, 050004, г. Алматы, ул. Панфилова, д. 205. E-mail: kaseankz@gmail.com

Жуков Михаил Иванович,

г. Алматы, Республика Казахстан. E-mail: kaseankz@gmail.com

Мазуров Алексей Карпович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор, академик Российской академии естественных наук, зав. каф. геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: akm@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности региональных работ при поисках месторождений цветных и благородных металлов в рудных провинциях Казахстана.

Цель исследования: анализ, обобщение и переинтерпретация региональных геологических и геофизических материалов с целью выделения перспективных участков для постановки поисковых работ на цветные и благородные металлы.

Методы исследования. Применен комплекс геолого-геофизических методов: глубинное сейсмическое зондирование и метод наблюдаемого гравитационного поля, спектральный и химический анализ керновых, бороздовых и металлометрических проб, а также методы геологического картирования масштабов 1:200000–10000.

Результаты. В результате анализа, обобщения и переинтерпретации региональных геологических и геофизических материалов масштабов 1:200000–1:50000, с учетом совокупности предпосылок и признаков оруденения, авторами впервые выделена Каскырказган-Каратасская рудная зона (ККЗ). ККЗ располагается в северо-западном Прибалхашье, вблизи сочленений крупнейших структур этого района: Токрауского мегасинклинария, Сарысу-Моинтинского и Актауского антиклинориев, образующих Атасу-Жонгарский срединный массив. В пределах зоны выделены три крупных рудных узла: Каскырказган-Аузбакенский (КА), Конырат-Борлинский (КБ) и Жамантас-Каратасский (ЖК). На площади первого околнурены рудные поля Каскырказган-Кенькудук-Кепчам-Аузбакенской группы месторождений и рудопроявлений; второго – Конырат-Каратас-Торткольской и Борлинско-Западно-Борлинско-Коскопинской групп и третьего – Сарыкум-Жамантас-Актауской и Каратас-Кокзабой-Коскудук-Мыншун-Курской групп. В ККЗ установлено более 40 месторождений и рудопроявлений меди, свинца, цинка, молибдена, вольфрама, железа. Показано, что при прогнозных работах особое внимание следует обращать на области развития гранодиоритовых и гранит-гранодиоритовых массивов, с которыми генетически связано медно-порфировое оруденение. Собственно перспективные участки оруденения определяются геофизическими и геохимическими методами в сочетании с участками максимального проявления гидротермальных процессов от щелочных до ультракислых, отмечаемыми в ряде случаев железными «шляпами» окисленных руд. Проведенные исследования позволяют дополнительно прогнозировать выявление крупных запасов меди, полиметаллов и других полезных ископаемых, в региональном плане связанных с градиентными зонами верхней мантии.

Ключевые слова:

Линеаменты, астеносфера, геодинамика, кальдера, мегаштокверк, рудные зоны, узлы, поля, ресурсы, инновации, Генеральная программа, Северное Прибалхашье.

Введение

В соответствии с прогнозом развития медного минерально-сырьевого комплекса Казахстана до 2030 г. подготовленная сырьевая база не в состоянии обеспечить достигнутый уровень производства меди за пределами 2020–2025 гг. Особенно остро стоит проблема обеспеченности Балхашского комбината. Ее решение видится в поисках и разведке новых конкурентоспособных месторождений. Имеющиеся геологические предпосылки и недостаточная степень опоскованности на медь ряда перспективных зон дает основание считать эту за-

дачу вполне выполнимой. Открытие в последние годы золото-медно-порфирового месторождения Нурказган с высоким качеством руд подтверждает этот тезис. Приоритетными при прогнозно-поисковых исследованиях остаются работы, ориентированные на традиционные для Казахстана типы месторождений.

Как показывает практика, металлогенические комплексы с промышленным медным оруденением формировались в геодинамических условиях активных транзиталей – в краевых вулканоплутонических поясах с задуговыми прогибами и в

островных дугах. В краевых вулканоплутонических поясах оруденение представлено медно-порфировыми и связанными с ними скарновыми месторождениями. Наибольшие перспективы на медь связаны с порфировыми системами фронтальных и центральных областей вулканоплутонических поясов (коунрад-актогайский, самарский, нижнеилийский, балхашский, саякский и каратаский металлогенические комплексы) [1]. Месторождения приурочены к порфировым системам различной глубинности, связанным со штоками порфировых пород плагиигранит-диоритового ряда. В глубинных системах образовались порфировые месторождения с относительно бедным оруденением (Актогайская группа, Коксай и др.). С некоторыми из них связаны скарновые месторождения с богатыми медными и золото-медными рудами (Саякская и Каратаская группы). В приповерхностных системах формируются богатые руды, ассоциирующие с вторичными кварцитами (Нурказган, Восток 1 и Кобырат). В верхних частях разреза и по периферии таких систем часто образуются эпitherмальные золото-серебряные руды. Одним из таких недоизученных участков остается сочленение фронтальной области верхне-палеозойского и центральной области девонского вулканоплутонических поясов, который мы называем Каскырмазган-Каратаской зоной.

Геодинамическая позиция

Каскырмазган-Каратаская зона (ККЗ) располагается в северо-западном Прибалхашье, вблизи сочленений крупнейших структур этого района: Токрауского мегасинклинария, Сарысу-Моинтинского и Актауского антиклинориев [2], образующих Атасу-Жонгарский срединный массив (рис. 1). Зона сложена девон-карбон-пермскими вулканогенными и вулканогенно-осадочными отложениями, а также терригенными и вулканогенными образованиями силура и регионально-метаморфизованными породами среднего и верхнего рифея, образующими сводовые части Кызылеспинской, Жамантаской и других антиклинальных структур, являющихся южным и юго-восточным продолжениями Сарысу-Моинтинского и Актауского антиклинориев. Протерозой-палеозойские отложения прорваны разновозрастными (от рифея до нижнего триаса) гранитоидами (граниты, сиениты, гранодиориты, диориты, монцодиориты и др.) интрузивными массивами. Широко развиты крупные разрывные нарушения (рис. 2) северо-восточного и северо-западного направления со сдвигами амплитудой от нескольких сот метров до 1...2 км. Крупные нарушения, по-видимому, являются отголосками региональных глубинных разломов древнего заложения и длительного развития. Подтверждающими материалами данного предположения являются результаты глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и наблюдаемого гравитационного поля, согласно которым район ККЗ находится в пределах аномального подъема

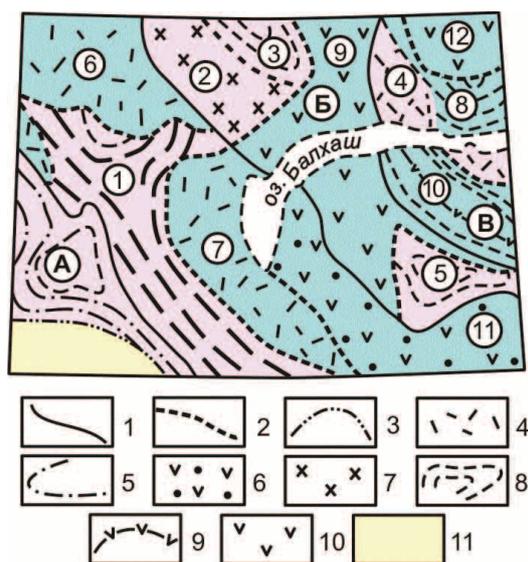


Рис. 1. Фрагмент схемы тектонического районирования Казахстана (по Беспалову, 1976). 1-3 – границы складчатых систем и срединных массивов (1), тектонических форм 3-го порядка (2) и плит молодых платформ (3); 4-6 – области каледонской складчатости (4 – вулканогенная моласса, 5 – осадочный комплекс, 6 – вулканогенный комплекс); 7-10 – области герцинской складчатости (7 – байкальский комплекс, 8 – осадочный комплекс, 9 – вулканогенный комплекс, 10 – вулканогенная моласса); 11 – область молодой платформы-плиты. Буквы в кружочках – складчатые системы (СС) и срединные массивы (СМ): А – Чуйский СМ; Б – Атасу-Жонгарский СМ; В – Жонгаро-Балхашская СС. Цифры в кружочках – тектонические структуры третьего порядка: 1-5 – антиклинории: 1 – Чу-Илийский, 2 – Сарысу-Моинтинский и Актауский, 3 – Жаман-Сарысу, 4 – Кентарлауский и Тюлькуламский, 5 – Текелейский; 6-12 – синклинии: 6 – Приатасу, 7 – Западно-Прибалхашский, 8 – Саякский, Арганатинский и Тастауский, 9 – Токрауский, 10 – Северо-Жонгарский, 11 – Илийский, 12 – Северо-Балхашский

Fig. 1. Kazakhstan tectonic classification plan fragment (by Bepalov, 1976). 1-3 are the boundaries of fold systems and middle massifs (1), tectonic forms of the third order (2) and young platforms plates (3); 4-6 are the areas of Caledonian folds (4 is the volcanic molasse, 5 is the sedimentary complex, 6 is the volcanic complex); 7-10 are the areas of Hercynian folds (7 is the Baikalsk complex, 8 is the sedimentary complex, 9 is the volcanic complex, 10 is the volcanic molasse); 11 is the area of young platform-plate. Letters in circles are fold systems (FS) and middle massifs (MM): A is Chuya MM; B is Atasu-Zhonggar MM; C is Zhonggar-Balkhash FS. Numbers in circles are the composite anticlines: 1 is Chu-Ile, 2 is Sarysu-Mointinsk and Actau, 3 is Zhaman-Sarysu, 4 are Kentarlussk and Tyulkulamsk, 5 is Tekelysk; 6-12 are the composite synclines: 6 is Priatasuysk, 7 is Western Balkhash, 8 is Sayaks, Arghanatinsk and Tastsusk, 9 is Tokrausk, 10 is Northern Zhonggar, 11 is Ile, 12 is Northern Balkhash

поверхности Мохоровичича (рис. 2), по зоне градиентов которого предполагаются глубинные (трансрегиональные) линейменты северо-восточного простирания, пронизывающие границу Мохо, зем-

ную кору и верхнюю мантию. Параллельно им на севере проходит Успенская зона глубинных разломов, на юге – Южно-Казахстанская, которую признают как раскол в земной коре [3], погружающийся на юг до глубины 300 км под Памир. Значит, Южно-Казахстанская зона разломов проникает в астеносферу, предполагаемую на глубинах от 100 до 200...250 км. Поперечно к северо-восточным системам разломов расположены трансформные разломы, также предполагаемые по зоне градиентов изоглубин Мохоровичича, прослеживаемые от Прибалхашья на юго-востоке до Тенизской впадины на северо-западе. Внутри градиентных зон находятся Западно-Балхашский, Жезказганский, Тенизский синклиории. Область расположения ККЗ – единственный регион в восточной половине Казахстана, где по данным ГСЗ граница Мохо так близко приближается к дневной поверхности. По-видимому, именно по градиентным полям, отождествляемым тектоническими нарушениями, пересекающими сплошности литосферы, происходил резкий подъем мантии, вызвавший «пробуждение» глобальных геодинамических процессов [4].

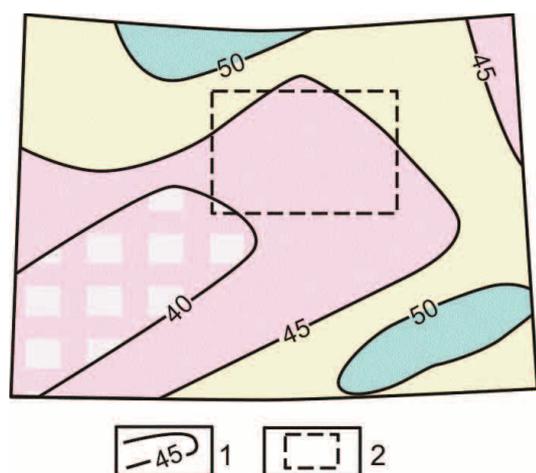


Рис. 2. Fragments of the Moho surface isodepth by the materials of deep seismic sounding (DSS) and deep seismic profiling (DSP) [9]: 1 – isodepths in km; 2 – contour of Kaskyrkazgan-Karatassk ore zone

Fig. 2. Fragments of the diagram of Moho surface isodepth by the materials of deep seismic sounding (DSS) and deep seismic profiling (DSP) [5]: 1 are isodepths in km; 2 is the contour of Kaskyrkazgan-Karatassk ore zone

Согласно минерагеническому районированию территории Казахстана [6–9], ККЗ находится в пределах окраинно-континентальных вулканоплутонических поясов и континентальных рифтов. В пределах этой зоны известны разведанные месторождения Гульшад и Кокзабой и несколько перспективных рудопроявлений медно-полиметаллических руд.

Из карты аномального магнитного поля ДТа видно [5], что границами этих поясов (рис. 3) так-

же являются разрывные нарушения, установленные при геологическом картировании, которые отчетливо фиксируются резкими градиентными полями либо узлокальными положительными и отрицательными аномалиями. Магнитной съемкой, кроме линейно-вытянутых тектонических нарушений, выделяются разломы дугообразной формы, которые, в свою очередь, подразделены на крупные разломы и разломы первого и более высоких порядков. Первые из них – разделяющие крупные тектонические блоки – расположены на западе и востоке ККЗ (за контуром) и отмечаются резкой сменой знаков магнитного поля, от отрицательного на западе и востоке ККЗ к положительным знакопеременным внутри ККЗ. Крайняя западная дуга, имеющая в центральной части меридиональное простирание, на севере – северо-восточное, а на юге – юго-восточное, совпадает с мощными тектоническими нарушениями – Кызылкемирскими сбросами (рис. 3) с фрагментами Новалинской зоны разломов, выделенными при геологической съемке масштаба 1:200000, фиксирующими непосредственный контакт западной внешней части Токрауского синклиория с Кызылэспинским антиклинорием. По характеру магнитного поля контакт между этими структурными единицами крутой.

Крайняя восточная дуга, по-видимому, отмечает резко погруженную часть Северо-Балхашского антиклинория под Балхашским (Коньратским) синклинорием после его постепенного прогибания на запад от уровня Бактайской зоны глубинных разломов меридионального простирания, осложненной надвигами и сбросо-сдвигами. Центральная дуга располагается внутри Балхашского синклинория, вблизи западного контакта Коньрат-Борлы-Каскырмазганской группы магматических массивов, которые прорывают породы, слагающие Балхашский синклинорий, Северо-Балхашский антиклинорий.

Между западным и центральным дугообразными нарушениями предполагается присутствие огромной вулканоплутонической кальдеры размером более чем 80×60 км, сводово-жерловая часть которой, по-видимому, находится в низовьях р. Жамши, в ее дельтовой части. Центральная часть кальдеры сложена ниже-верхнепермскими и девон-карбоновыми отложениями, а восточная и западная – интрузивными породами, имеющими возраст от нижней перми до верхнего рифея с огромными останцами и ксенолитами венд-кембрия и силура в надинтрузивной части плутонов.

Между центральным и восточным дугообразными тектоническими нарушениями вблизи Коньратской группы месторождений установлена вторая вулканоплутоническая структура с размерами в плане 25×20 км. Структура на северо-западе срезается Бектауатинской системой глубинных разломов, совпадающей с южным контактом одноименного плутона ультракислых гранитов перм-

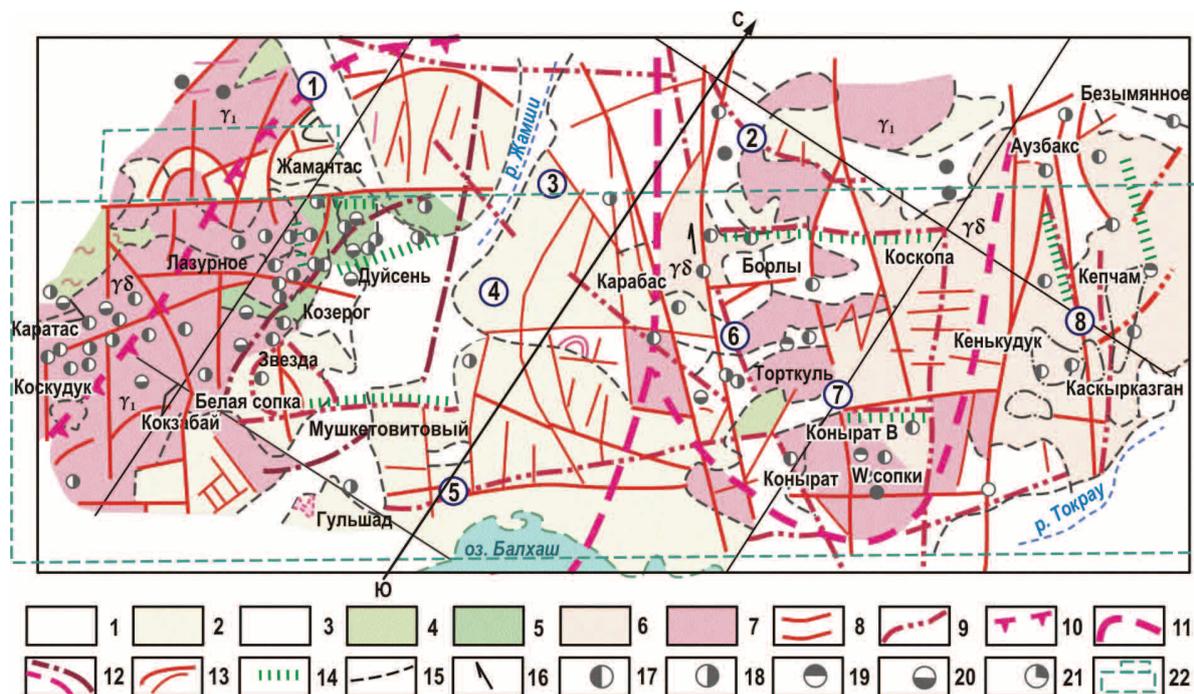


Рис. 3. Генерализованная схема геологического строения Каскырказган-Каратасской рудной зоны (составил С.А. Акылбеков с использованием [2–4, 6]). 1 – неоген-четвертичные отложения; 2 – субщелочные вулканиты кислого и среднего состава пермского возраста; 3 – вулканогенные (кислые и основные) и осадочные (карбонатные и терригенные) образования девон-карбона; 4 – регионально-метаморфизованные породы рифея; 5 – осадочные преимущественно терригенные отложения венд-кембрий-силура; 6–7 – интрузивные образования: 6 – гранодиориты, 7 – граниты; 8–14 – тектонические нарушения: 8–12 – крупные: 8 – представленные на геологических картах, 9 – по данным гравизразведки преимущественно регионального развития; 10–12 – по данным магнитной съемки: 10 – разделяющие крупные тектонические блоки (структуры), 11 – первого порядка, 12 – более высоких порядков; 13 – относительно непротяженные, малоамплитудные, в т.ч. полуконцентрические сбросо-сдвигового характера по геолого-геофизическим данным; 14 – по зоне градиентов A_g , картирующие размещение месторождений и рудопроявлений; 15 – геологические границы; 16 – сдвиги; 17–21 – месторождения и рудопроявления: 17 – медно-порфировые, 18 – медно-полиметаллические, 19 – редких металлов, 20 – железа, 21 – золота; 22 – контур основных результатов геолого-геофизических работ (рис. 4). Цифры в кружочках – долгоживущие разрывные нарушения: 1 – Кызылкемирский; 2 – Бектаутинский; 3 – Сарыкум-Бектаутинский; 4 – Каратас-Кепчамский; 5 – Гульшад-Коныратский; 6 – Конырат-Западно-Борлинский; 7 – Коныратский; 8 – Каскырказган-Кепчамский

Fig. 3. Generalized diagram of Kaskyrkazgan-Karatassk ore zone structure (drawn by S.A. Akylbekov using [2–4, 6]). 1 are neogene-quaternary deposits; 2 are silicic and intermediate subalkaline volcanic of Permian age; 3 are volcanic (silicic and and basic) and sedimentary (carbonate and terrigenous) formations of Devon-Carbon; 4 are regional-metamorphosed rocks of Riphean; 5 are mostly terrigenous sediments of Vendian-Cambrian-Silurian; 6–7 are intrusive formations: 6 are granodiorites, 7 are granites; 8–14 are tectonic faults: 8–12 are large-scale: 8 are plotted on geological maps, 9 by the data of gravity exploration, mostly of regional development; 10–12 by the data of magnetic survey: 10 are those dividing large tectonic blocks (structures), 11 are those of the first order, 12 are those of higher orders; 13 are those relatively nonextended, low-amplitude, including half-concentric of wrench-fault type by the geological and geophysical data; 14 by A_g gradient zone, which plotting positions of deposits and ore occurrences; 15 are the geological boundaries; 16 are the shifts; 17–21 are the deposits and ore occurrences: 17 porphyry copper, 18 polymetallic copper, 19 rare metals, 20 iron, 21 gold; 22 contour of the main results of geological and geophysical works (Fig. 4). Numbers in circles are long-living faults: 1 – Kyzylkemiirsk; 2 – Bektautinsk; 3 – Sarykum-Bektautinsk; 4 – Karatas-Kepchamsk; 5 – Gulshad-Konyrat; 6 – Konyrat-Western-Berlinsk; 7 – Konyrat; 8 – Kaskyrkazgan-Kepchamsk

ского возраста. Центральную часть вулcano-плутонической структуры занимают нижнепермские и верхнекарбонные гранитоиды, а периферийную – главным образом гранодиориты топарского комплекса, относимые к гранитоидам Токрауского плутона [10–12]. Наличие кальдерных и жерловых структур подтверждается несколькими изоконцентрическими и полуконцентрическими разрывными нарушениями, подтвержденными геологическими наблюдениями.

Предполагаемые трансрегиональные тектонические нарушения глубинного заложения и их производные, а также дугообразные надвиги и сдвиги свидетельствуют о сложной истории геологического развития района, сопровождавшегося мощными вулcano-плутоническими процессами [13]. Предполагается, что при этом состав магматических пород не только изменялся от основного до кислого в зависимости от удаленности от места столкновения плиты с океанической корой и угла

ее погружения, но и сами магматические породы обогащались рудными компонентами.

Наблюдаемые на поверхности Земли на уровне эрозионного среза тектонические нарушения, тектонические контакты между крупными блоками по структуре гравимагнитных полей в основном имеют крутые углы падения. Не исключается, что они на глубине выполаживаются вплоть до горизонтального смещения по ним, как обычно бывает при крупных надвиговых тектониках. Согласно линеamentной металлогении, локализация рудных узлов с крупными, уникальными и гигантскими месторождениями определяется пересечением глубинными разломами свода астеносферной ловушки, являющегося составной частью мантийной рудогенерирующей системы [4].

В пределах ККЗ разгрузка рудных материалов происходила не в пределах глубинных линеаментов северо-восточного простирания, соединяющих районы месторождений Каскырказган и Каратас, а на пересечении их с более молодыми глубинными

разломами северо-западного направления, вдоль которых вытянуты выделяемые рудные узлы. Следовательно, можно предполагать, что астеносферную ловушку пересекают и разрывы северо-западного простирания.

Все эти вопросы поднимаются в связи с крайней необходимостью детальной переинтерпретации данных глубинных сейсмических зондирований, выявления тесной положительной корреляционной связи между ГСЗ, редукцией Буге, рельефом земной поверхности, с прикладными материалами по геологическому изучению недр, т. к. до настоящего времени поиски месторождений ориентировались исключительно на близповерхностные геолого-геофизические методы и почти никогда – на результаты глубинного зондирования литосферы, региональных полей грави- и магнитометрии. Очевидно, что затрагиваемые вопросы являются колоссальными по своей сложности, в то же время могут предсказать другие векторы для выявления крупнейших месторождений полезных ископаемых.

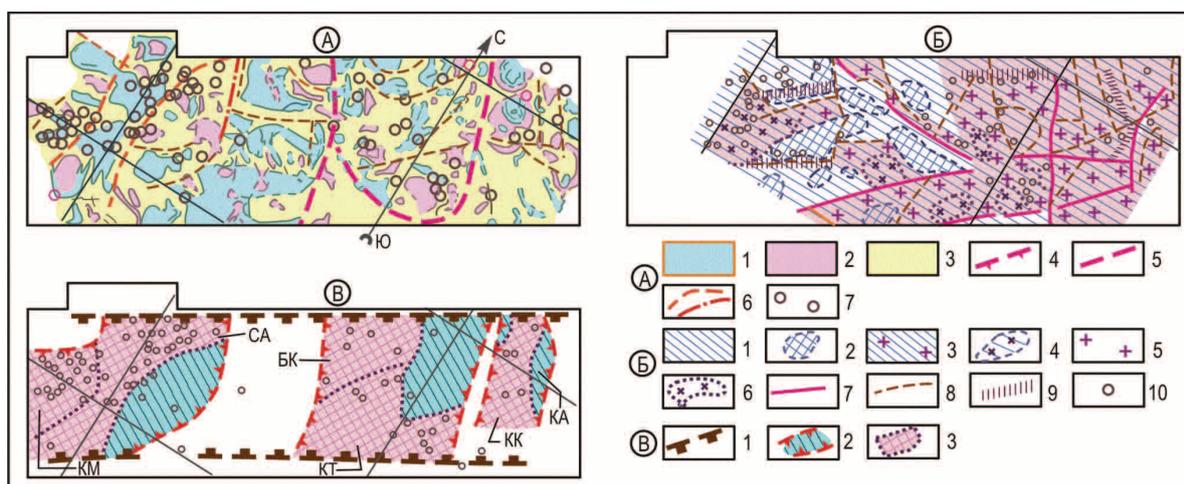


Рис. 4. Основные результаты геолого-геофизических работ по Каскырказган-Каратасской рудной зоне (составил С.А. Акылбеков). А – фрагменты аномального магнитного поля: 1–2 – аномалии: 1 – положительные, 2 – отрицательные; 3 – межаномальные поля; 4–6 – рис. 3 (10, 11, 12); 7 – месторождения и рудопроявления. Б – основные структурно-тектонические элементы по данным гравиразведки. 1–4 – положительные аномалии A_g , картирующие области развития: 1–2 – рифей-силурийских образований (1), их апикальных выступов (2), 3–4 – гранодиоритов (3), их апикальных выступов (4); 5–6 – отрицательные аномалии, картирующие граниты, гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры (5), их апикальные выступы (6); 7–8 – тектонические нарушения: 7 – регионального развития, 8 – относительно непротяженные; 9 – рис. 3 (14); 10 – месторождения и рудопроявления. В – схема металлогенического районирования: 1–3 – границы: 1 – Каскырказган-Каратасской рудной зоны; 2 – рудных узлов: Каскырказган-Аузбакенского (КА), Конырат-Борлинского (КБ), Жамантас-Каратасского (ЖК), 3 – рудных полей месторождений и рудопроявлений: Каскырказган-Кенькудук-Кепчам-Аузбакенской группы (КК); Конырат-Карабас-Торткольской группы (КТ); Борлинско-Зап. Борлинско-Коскопинской группы (БК); Сарыкум-Жамантас-Актауской (Белая сопка) группы (СА); Каратас-Кокзайбой-Коскудук-Мыншункурской (КМ) группы

Fig. 4. Main results of geological and geophysical works in Kaskyrkazgan-Karatass ore zone (drawn by S.A. Akylbekov). A are fragments of anomalous magnetic field: 1–2 are anomalies: 1 positive, 2 negative; 3 are inter-anomalous fields; 4–6 see Fig. 3 (10, 11, 12); 7 are deposits and ore occurrences. B are the main structural-tectonic elements by the data of gravity exploration. 1–4 are positive anomalies of A_g , plotting the proveniences of: 1–2 – Riphean-Silurian formations (1), their apical prominences (2), 3–4 granitoids (3), their apical prominences (4); 5–6 are negative anomalies, plotting granites, granite-porphyrries, granitoid – porphyries (5), their apical prominences (6); 7–8 are the tectonic faults of: 7 regional proveniences, 8 relatively non-extended; 9 see Fig. 3. (14); 10 are the deposits and ore occurrences. B is the diagram of metallogenic classification of: 1–3 the boundary: 1 Kaskyrkazgan-Karatass ore zone; 2 ore nodes: Kaskyrkazgan-Auzbaken (KA), Konyrat-Borlinsko (KB), Zhamantass-Karatass (JK), 3 ore fields of deposits and ore occurrences: Kaskyrkazgan-Kenkuduk-Kepcham-Auzbaken group (KK); Konyrat-Karabas-Tortkol group (KT); Borlinsk-Western Borlinsk-Koskopinsk group (BK); Sarykum-Zhamantass-Aktaus (Belaya sopka) group (CA); Karatass-Kokzaboy-Koskuduk-Mynshunkursk (KM) group

Таким образом, в реальной послезерозионной геологической обстановке конкретными признаками оруденения являются тектонические и тектоно-магматические. При прогнозных работах особое внимание следует обращать на области развития гранодиоритовых и гранит-гранодиоритовых массивов, с которыми генетически связано медно-порфировое оруденение. Собственно перспективные участки оруденения определяются геофизическими и геохимическими методами в сочетании с участками максимального проявления гидротермальных процессов от щелочных до ультракислых [6], отмечаемыми в ряде случаев железными «шляпами» окисленных руд.

Нами произведены анализ, обобщение и переинтерпретация региональных геологических и геофизических материалов масштаба 1:1000000, которые в свое время были составлены с использованием фактических материалов масштаба 1:200000–1:50000, иногда крупнее, то есть они по своему содержанию соответствуют геологическим материалам среднего масштаба. В результате интерпретации указанных материалов, с учетом совокупности предпосылок и признаков оруденения, нами впервые выделена Каскырказган-Каратасская зона как рудная (рис. 4). Протяженность ККЗ более 150 км при ширине около 50 км, на северо-востоке и юго-западе ККЗ ограничивается древними структурами, на северо-западе Сарыкум-Бектауатинской и на юго-востоке Гулыиад-Коньратской – зонами глубинных разломов. На востоке, севере, северо-западе, за контуром ККЗ располагаются золоторудные месторождения с относительно высокими содержаниями и запасами до сотен тонн.

Минералогия

В пределах ККЗ выделены три крупных рудных узла (рис. 4): Каскырказган-Аузбакенский (КА), Коньрат-Борлинский (КБ) и Жамантас-Каратасский (ЖК). На площади первого околнурены рудные поля Каскырказган-Кенькудук-Кепчам-Аузбакенской группы месторождений и рудопроявлений; второго – Коньрат-Каратас-Торткольской и Борлинско-Западно-Борлинско-Коскопинской групп и третьего – Сарыкум-Жамантас-Актауской и Каратас-Кокзабой-Коскудук-Мыншункурской групп, площадью соответственно >40×10; 40×15; 30×20; >50×15; >20×20 км. В ККЗ установлено более 40 месторождений и рудопроявлений меди, свинца, цинка, молибдена, вольфрама, железа. Все три рудных узла со своими рудными полями располагаются не вдоль ККЗ, а в крест, подчиняясь простирацию областей стыковки древних структур с молодыми: на востоке – Северо-Балхашского антиклинория с Коньратским синклинорием; в центре – Жамантасского антиклинория с Коньратским синклинорием; на западе – Кызылеспинского антиклинория с Жамантасским антиклинорием через наложенные мульды. Области стыковки по геологическим данным фиксируются зонами долгоживущих глубинных разломов.

В выделенных рудных полях наиболее изученными являются месторождения Коньратской группы: Борлы, Каратасской группы: Кокзабой, хотя и их не следует считать достоверно изученными, так как окончательно не околнурены в пространии выявленные рудные тела.

Коньрат-Борлинский рудный узел (КБ). Медно-порфировое месторождение Коньрат, известное издревле, приурочено к гранодиоритам, гранодиорит-порфирам, гранит-порфирам. В гравитационном поле месторождение находится вблизи градиентной части интенсивного минимума площадью около 200...250 км², а в магнитном – в пределах изометричной формы отрицательного поля, окаймляемого положительными аномалиями, что является одним из основных признаков оруденения. Медно-порфировые руды на месторождении распространены до глубины 700 м и практически отработаны. Отработаны также руды Молибденового участка Коньратского месторождения, связанные с аляскистыми гранитами акчатауского комплекса. Анализ материалов показывает, что перспективы Коньратского рудного поля полностью не исчерпаны, в частности, на выявление редкометалльных руд. В связи с этим необходима переинтерпретация посредством новейшей инновационной методики всех геолого-геофизических и геохимических материалов, в том числе материалов скважинных геофизических исследований с составлением геолого-экономической модели каждого рудного участка согласно современным условиям: самого медно-молибденового месторождения Коньрат в связи с недостаточной изученностью его флангов и глубоких горизонтов; молибденового – Восточный Коньрат, молибден-бериллиевого – Северный Коньрат; висмут-вольфрам-молибденового рудопроявления, а также вольфрамовых проявлений в вольфрамовых сопках и фемолитового оруденения в зоне Среднего разлома [6, 14].

От гравиминимума, обусловленного Коньратским гранитным массивом, в северо-западном направлении прослеживается линейно-вытянутая аномалия Ag протяженностью до 20 км при ширине 5...7 км. Аномалия в плане соответствует гребневидному выступу, нескрытому эрозией, Коньратского гранитного массива, к северо-восточному и юго-западному склонам которого приурочены: Торткульское, Западно-Торткульское и Карабасское рудопроявления. В магнитном поле здесь, как и на месторождениях Коньратской группы, зафиксированы отрицательные аномалии. «Положительное» сочетание гравимагнитных аномалий свидетельствует о необходимости проведения поисково-оценочных работ на этой площади. На рудопроявлении Карабас были пробурены четыре скважины, три из которых оказались безрудными, а одна на глубине вскрыла богатые медные руды, что является достаточной предпосылкой для тщательного анализа материалов всех геологоразведочных работ и их полной переинтерпретации.

Рудное поле Борлинской группы месторождений располагается в 30...35 км северо-западнее Коныратской группы и находится внутри отрицательного магнитного поля, окаймляемого положительными аномалиями [15]. Принципиальным отличием Борлинского рудного поля от Коныратского является расположение его в зоне влияния Бектауатинской системы глубинных разломов восточно-северо-восточного простирания, что отчетливо подчеркивается зоной градиентов гравиметрического поля. Рудное поле состоит из разведанного медно-молибденового месторождения Борлы, рудопроявления Западное Борлы, которое по геолого-геофизическим признакам оценивается нами как перспективное; рудопроявления Липаритовое, требующего переоценки геолого-геофизических и геохимических материалов, а также рудопроявления Коскопа, где было выявлено медно-молибденовое оруденение.

Каскырказган-Аузбакенский рудный узел (КА). Этот рудный узел является одним из перспективных в отношении выявления новых месторождений медно-молибденовых и редкометалльных руд. Рудный узел состоит из рудных полей месторождений Каскырказган, Кепчам, Кенькудук, Аузбаке, к этой группе можно отнести и рудопроявления Токрауское медное, Исабай, Шоркудук, Аблан. Общая площадь размещения этих месторождений и рудопроявлений с учетом их флангов составляет около 600 км². Из этой группы наиболее изученным является месторождение Каскырказган, которое на сегодняшний день является основным, хотя некоторые другие, к примеру, месторождение Кепчам, характеризуются значительно большей площадью «штокверкования» и после проведения детальных крупномасштабных работ могут оцениваться более внушительными параметрами оруденения. Месторождение Каскырказган, объемом более 10000 м по данным разведочного бурения и поверхностных горных выработок, представляет собой рудный штокверк трещиноватых, гидротермально-переработанных гранит- и гранодиорит-порфиров протяженностью до 800 м при ширине в среднем 560 м, вертикальной мощностью до 400 м и кровлей рудного тела от 0 до 20 м (рис. 5). С поверхности до глубины 50 м развита зона окисления с содержанием меди 2...3 %, до глубины 150...200 м наблюдаются халькозиновые и борнитовые руды, хотя зона вторичного сульфидного обогащения проявлена слабо. Предполагаемая мощность ее от 8 до 60 м. Содержание меди по месторождению колеблется от 0,11 до 3,94 %. С глубиной содержание его несколько увеличивается. Согласно существующим разрезам средняя горизонтальная мощность руды – 355 м, мощность по вертикали 345 м [16]. При установленной протяженности рудного штокверка 800 м прогнозные ресурсы составят: руды – 265 млн т, меди – 800 тыс. т.

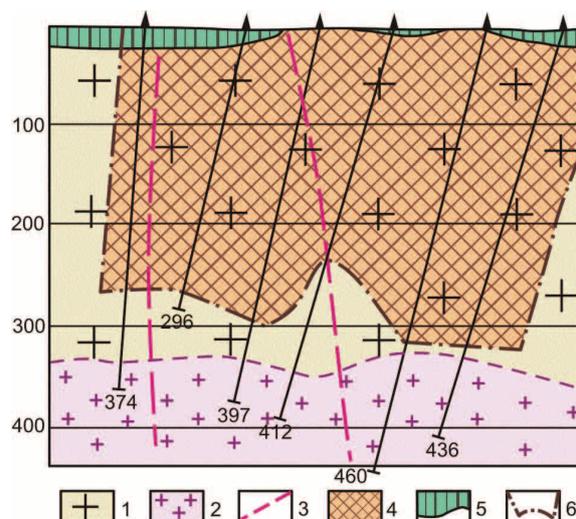


Рис. 5. Геологический разрез по одному из разведочных профилей месторождения Каскырказган (составил С.А. Акылбеков). 1 – лейкократовые гранит-порфиры (C_{2-3}); 2 – граниты средне-крупнозернистые (D_3); 3 – тектонические нарушения (а), поисково-разведочные скважины; 4–5 – медно-молибденовые руды: 4 – сульфидные, 5 – окисленные; 6 – контур подсчета запасов

Fig. 5. Geological section by one of survey profiles of Kaskyrkazgan deposit (drawn by S.A. Akylbekov). 1 are light-coloured granite-porphyrates (C_{2-3}); 2 are medium-grained granites (D_3); 3 are tectonic faults (a), exploration wells; 4–5 are copper-molybdenum ores: 4 sulphide, 5 oxide; 6 reserve calculation contour

Размеры штокверка на месторождении Кепчам [16] значительно больше, чем на Каскырказгане, и составляют 2060×500 м. Штокверк приурочен к апикальной части штока гранодиоритов топарского комплекса и его экзоконтакту, где выделены шесть линзовидных тел размерами по простиранию 100...370 м, по падению 50...250 м и по мощности 15...135 м при среднем содержании меди 0,34 %. По данным более детальных магниторазведочных работ выделены Каскырказганская и Кепчамская зоны. Месторождение Кепчам находится на пересечении этих зон, и в связи с этим его ресурсы, очевидно, будут более значительными, чем на других рудных объектах. Месторождение может быть отработано открытым способом. Утвержденные запасы меди по категории C_2 – 221 тыс. т при содержании его 0,26 %, молибдена – 16,7 тыс. т при содержании 0,02 %.

Имеются и другие сведения по месторождению, согласно которым Кепчамский штокверк в плане имеет овальную, близкую к изометричной форму и площадь около 0,32 кв. км. При содержании условной меди 0,25 % и выше сохраняются отдельные прослои слабооруденелых пород мощностью от 10 до 80 м. Оруденение скважинами вскрыто на глубину до 500 м, фланги его не околтурены, поэтому представления о морфологии штокверка, его размерах и внутреннем строении являются самыми общими.

Если весь штокверк площадью в 0,32 км² будет рудоносным, со средним содержанием меди 0,26 %, прогнозные ресурсы меди до глубины 500 м будут составлять около 1млн т.

В 5...6 км северо-западнее месторождения Кепчам, между месторождениями Аузбаке и Кепчам, зафиксирована близизометричная по форме положительная магнитная аномалия размером 8?6 км с интенсивностью в эпицентре до 500...600 нТл (рис. 6). Обычно аномалии, имеющие такую форму, являются особенно интересными в отношении поисков полезных ископаемых. В данном случае аномалия, очевидно, обусловлена гранодиоритовым массивом. Центральная положительная часть аномалии «пересекается» локальными отрицательными аномалиями широтного и северо-западного простираний, а северо-западная часть – аномалиями северо-восточного простирания шириной до 1000 м, очевидно, связанными с разрывными нарушениями, по которым предполагаются зоны дробления, окварцевания, калишпатизации и другие интенсивные гидротермальные переработки в пределах предполагаемого гранодиоритового массива. В случае рудной природы здесь могут быть выявлены значительные запасы медно-молибденовых руд. Аналогичное магнитовозмущающее тело предполагается на таком же расстоянии северо-западнее от месторождения Каскырмазан, т. е. между ним и месторождением Кепчам, природа которого также не изучена скважинами и горными выработками.

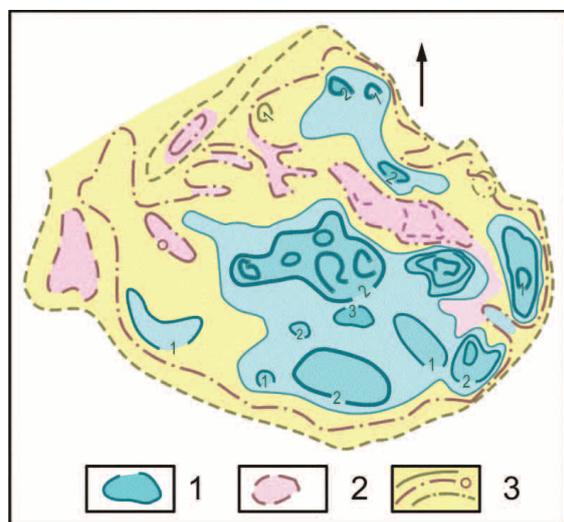


Рис. 6. Фрагменты аномального магнитного поля (в сотнях нТл) района месторождения Кепчам (составил С.А. Акылбеков): 1–2 – аномалии: 1 – положительные, 2 – отрицательные; 3 – межаномальное спокойное поле

Fig. 6. Fragment of anomalous magnetic field (in hundreds of nT) of the area of Kecham deposit (drawn by S.A. Akylbekov): 1–2 are anomalies: 1 – positive, 2 – negative; 3 – inter-anomalous quiet field

На месторождении Аузбаке выделено слепое рудное тело медно-порфирового геолого-промы-

шленного типа протяженностью до 200 м со средним содержанием меди 0,313 % и молибдена в 0,006 %. Перспективы на медно-порфировые руды не изучены. Не изучены также кварцевые жилы, несущие молибденовые оруденения. По данным опробывания керн колонковых скважин содержание молибдена составляет 0,21 %, что является очень богатым для этого региона. Кварцево-жильное поле прослежено от нескольких сот метров до 1000 м. То есть перспективы месторождения Аузбаке на молибденовые руды могут быть значительными и могут возрасти в несколько раз, так как гребневидные выступы аляскитовых гранитов, с которыми генетически связаны грейзеново-кварцевожильные и штокверковые месторождения редких металлов, прослеживаются от Майтасского массива до месторождений Аузбаке, Кепчам, рудопроявлений Безымянное и Аблан. Подсечения богатых молибденовых руд скважиной на месторождении Аузбаке и богатых содержаниях молибдена (до 0,04 %) во вторичных ореолах, значительных концентраций в шлиховых пробах площадью 22 км² на рудопроявлениях Безымянное и Аблан связаны с приближением к дневной поверхности рудоносных гранитов акштатауского комплекса. Вторичные ореолы рассеяния меди в 0,02...0,14 % и молибдена 0,005...0,01 % площадью 1,5 км², приуроченные к современным рыхлым образованиям с отдельными выходами кварцевых жил, были выявлены также в 4-х км к юго-западу от г. Аузбаке. Для определения их природы и практической ценности рекомендуется провести поисковые работы. На сегодня изучена относительно небольшая часть Аузбакенского месторождения, где запасы меди по категории Р₁ – 79,2 тыс. т и молибдена – около 1,6 тыс. т [17].

На месторождении Кенькудук содержание меди 0,43 %. На Токрауском – медь до 1,0 %, молибден – 0,01...0,1 % [16]. Оруденение гидротермальное, медно-порфировое. По данным средне- и крупномасштабных работ просматриваются значительные перспективы Кенькудукского месторождения и Токрауского рудопроявления, что подтверждается данными металлотометрической съемки, выявившей ореолы размером 500?200 м с содержанием меди 0,1...1,0 %. В районе месторождения Кепчам и Аузбаке известны рудопроявления меди Исабай, Шоркудук, Безымянное и Кеньказган, неизученные бурением. На участке Исабай в гидротермально измененных породах протяженностью 800...1000 м и шириной 50...100 м канавами вскрыта рудная минерализация колчеданно-полиметаллического характера с содержанием цинка до 2,0 %, свинца до 1,0 %, меди до 0,7 %, молибдена и ванадия до 0,08 %. На участке Кеньказган выявлена рудная зона протяженностью 550 м с содержанием меди на поверхности 1,5 %. На участке Безымянном размеры ореольно-рудной зоны составляют 1200×700 м, а содержание Си в штучных пробах достигает 0,5 %; на Шаркудукском участке зафиксированы значительные по площади

ореолы меди (1,5 км²) с содержанием ее до 0,3 %. Остаются неизученными и месторождения Кепчам, Аузбаке, Кенькудук и Каскырмазган. Имеющиеся геолого-геофизические материалы позволяют сделать предположение о том, что Каскырмазганская группа месторождений находит свое продолжение в южном направлении, с перерывами до Конаыратской группы.

Таким образом, предполагается, что Конаыратская группа месторождений и Каскырмазган-Аузбакенский рудный узел находятся в пределах крупнейшего мегаштокверка, вмещающего как медно-молибденовое, так и молибденовые и вольфрамовые месторождения. Для окончательной оценки перспектив предполагаемого мегаштокверка необходим анализ всех накопленных геологических, геофизических, геохимических материалов, в том числе данных аэрокосмических исследований всей территории Токрауского плутона и его эндо- и экзоконтактов.

Жамантас-Каратасский рудный узел (ЖК). Каратасская группа, состоящая из пяти месторождений медных, медно-молибденовых и медно-магнетитовых руд, среднее содержание меди в разведанных участках колеблется от 0,24 до 0,36 %, молибдена – от 0,015 до 0,11 %. Основные участки месторождений разведаны, запасы подсчитаны и утверждены ГКЗ СССР. В непосредственной близости от Каратасской группы месторождений находятся: в 5..10 км юго-восточнее – медно-полиметаллическое месторождение Кокзайбой, севернее – Кокзайбой медный и Аномалия VI, южнее – Коскудук полиметаллический, Коскудук скарновый, Коскудук медный. Месторождение Кокзайбой по сумме металлов свинца (3,3 %) и цинка (7,73 %), составляющей около 11 %, является уникальным в Центральном Казахстане и самым богатым в Казахстане после восточно-казахстанских [6, 18, 19]. Руды месторождений стратиформные, крутопадающие вплоть до вертикального залегания. Следует пересмотреть первичные материалы и выяснить, существуют ли предпосылки для пологой увязки рудных тел, что привело бы к улучшению горно-технических условий разработки месторождений и в значительной мере к увеличению разведанных запасов.

Между месторождениями Каратасской и Кокзайбойской групп находится железорудное месторождение Мыншункур, представленное двумя скарново-рудными телами пластообразной формы. Протяженность основного рудного тела 600...800 м, второго – 300 м, мощность колеблется от 40 до 80...100 м. Рудные тела приурочены к осадочным породам и сланцам на контакте с гранодиоритами. Руды – актинолит-магнетитовые, магнетитовые, гематит-браунитовые. Пробурены две скважины. По первой истинная мощность рудного тела 28,5 м при содержании железа 41 %, по второй вскрыты такие же магнетитовые руды, однако анализы имеются только по 10-метровому интервалу. Аномальный эффект от вскрытых рудных

тел составляет около 25...30 % от наблюдаемого поля. Предполагаемая мощность рудных тел по геолого-геофизическим данным от 60 до 120 м. Прогнозные ресурсы более 10 млн т. Попутными полезными ископаемыми месторождения являются Cu, Pb, Au и редкие металлы. Кроме того, на месторождении пересечены самостоятельные пластообразные залежи сфалерита.

В целом рудные поля Каратас-Кокзайбой-Коскудук-Мыншункурской группы, состоящей из 10–15 месторождений и рудопроявлений медных, медно-полиметаллических, редкометалльных и железных руд площадью около 450 км², заслуживают полной переоценки. Не вызывает сомнения, что значительно будут расширены запасы некоторых известных месторождений и выявлены новые промышленные объекты.

В этом рудном узле весьма перспективными являются рудные поля месторождений и рудопроявлений Сарыкум-Жамантас-Актауской (Белые сопки) группы, которая практически является северным продолжением Каратас-Кокзайбойской группы месторождений. Площади рудных полей с более чем 20 месторождениями и рудопроявлениями составляют 500...550 км² при протяженности 40...45 км и находятся в непосредственной близости от железнодорожной ветки Моинты-Балхаш. В пределах некоторых из них в разные годы проведены небольшие объемы геологоразведочных работ, однако ни одному рудному объекту не была дана промышленная оценка, хотя с момента их выявления прошло более 70–75 лет. Данные геологосъемочных работ, результаты переинтерпретации геофизических материалов, данные геохимических исследований и небольшого объема геологоразведочных работ дают все предпосылки для поисков значительных по запасам месторождений гидротермального, гидротермально-пневматалитового, скарнового и скарново-метаморфизованного типов. Основанием для таких выводов является, прежде всего, геолого-тектоническая позиция – расположенность вблизи сочленения древнего Кызылеспенского антиклинория с Токрауским синклинорием, где предполагается крупная вулканоплутоновая структура. В центре структуры находятся рудные проявления и перспективные участки, приуроченные к местам пересечения крупных глубинных разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного направлений. Рудопроявления приурочены к древнейшим рифейским образованиям ядерной части Жамантасского антиклинория, которые прорваны несколькими гранитоидными массивами площадью от первых до 50...60 км². Вообще, Жамантасский антиклинорий с отложениями, занимающими синклинальную часть (Белькудукская, Таскудукская, Жуантобинская и др.), по данным гравиметрических исследований представляет собой крупный тектонический блок, имеющий форму четырехугольной коробки размером 50×50 км, простирается в северо-восточном направлении и резко срезается То-

крауским и Бектауатинским плутонами. Во внутренней части антиклинория зафиксированы гравимагнитные аномалии положительного и отрицательного знаков, которые хорошо диагностируются и находят свои геологические объяснения, в том числе аномальные поля, фиксирующие рудные объекты. Данными магнитной съемки выделены все железорудные объекты скарново-магнетитового, магнетит-гематитового, магнетит-мушкетовитового состава. Одним из первых открытых месторождений в Жамантасском антиклинории является месторождение Дуйсень, зафиксированное в 1940 г. аномалией вертикальной составляющей магнитного поля интенсивностью до 900 нТл на контакте гранодиоритов с известняками. В том же году под наносами на глубине 3,5 м были выявлены скарново-магнетитовые руды с содержанием Fe_2O_3 от 69 до 81 %. Судя по геолого-геофизическим материалам, по всему экзоконтакту гранодиоритового массива прогнозные ресурсы железных руд составляют около 10 млн т.

Наиболее крупным месторождением Сарыкум-Жамантас-Актауской группы является Сарыкумское [20], признанное как железорудное, хотя в контуре железных руд высокие содержания и других полезных ископаемых. Месторождение находится в самой эпицентральной части Жамантасского антиклинория, где слагающие его осадочные породы на контакте с гранитоидами превращены в серпентинитизированные гранатовые и диопсидовые скарноиды, вмещающие серпентин-магнетитовые руды с послыйным магнетитом. Скважиной, пробуренной до 220 м, с глубины от 21 до 120,7 м вскрыты скарны с магнетитовыми рудами мощностью 99,7 м со средним содержанием железа 20,2 %. На эту мощность содержание меди – 0,29 %, цинка – 0,7 %. В отдельных интервалах содержание железа достигает 38 %, меди – 1,08 %, цинка – 4,2 % (рис. 7). Имеется информация, что в этом интервале содержание золота составляет 10 г/т. Скарново-магнетитовые руды отчетливо фиксируются двумя интенсивными магнитными аномалиями протяженностью 1000 и 500 м при ширине соответственно 100...200 и 200...300 м общей площадью около 1,5...2,0 км². Вскрытые скважинами скарново-магнетитовое, медное, цинковое и золотое оруденения являются, несомненно, интересной предпосылкой для выявления комплексного промышленного месторождения. Таким образом, на месторождении Сарыкум основная масса железных руд ассоциирована с медными и медно-полиметаллическими рудами. Ожидаемые запасы скарново-магнетитовых руд при указанных параметрах и объемном весе 3,0 т/м³ составляют не менее 50 млн т. В случае подтверждения содержания золота это месторождение может оцениваться больше как золоторудное с крупными его запасами [21]. Между рудопроявлениями Дуйсень и Сарыкум находится рудопроявление Придорожное, отмеченное магнитной аномалией в 13000 нТл, перспективное на желез-

ные и медно-молибденовые руды, но не получившее оценки. Не изучено и железорудное проявление Бесикжал. К числу недостаточно изученных относится и рудопроявление Киматас, расположенное в 12 км ЮЗ рудопроявления Дуйсень, в пределах которого бурением поисковых скважин было вскрыто скарново-магнетитовое оруденение, не прослеженное ни по простиранию, ни по падению, не установлена также его истинная мощность. Нет минералогического анализа. Не дана оценка также месторождению Мушкетовитовое, магнетитовые руды которого с запасами более 15 млн т со средним содержанием железа 38 % строго приурочены к гранатизированным горизонтам кремнистых известняков [18].

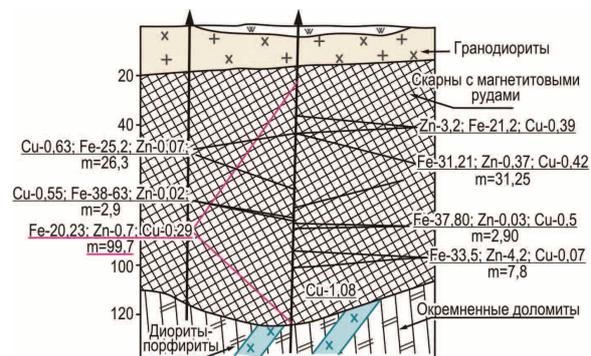


Рис. 7. Геологический разрез через южную зону Сарыкумского месторождения

Fig. 7. Geological section through southern area of Sarykum deposit

Вся надинтрузивная зона Жамантасского интрузивного массива является весьма перспективной и на поиски свинцово-цинкового, медно-полиметаллического, редкометалльного, золото-серебряного оруденения. Перспективные участки на геологических материалах выделены как зоны интенсивных гидротермальных переработок вплоть до преобразования некоторых надинтрузивных пород во вторичные кварциты, а в геохимических и геофизических полях – комплексными ореоло-аномальными зонами. По данным геологической съемки масштаба 1:200000 (О.М. Гаек, И.И. Чуркин, 1968 г.) в пределах надинтрузивной зоны, а также в экзо- и эндоконтактах выходов интрузивных массивов выявлены рудопроявления Жамантас I с содержанием свинца, цинка и меди до 4 %, серебра – 1000 г/т, висмута – 0,08 % (присутствует золото); Жамантас II – Pb – 0,3, Zn – 0,6, Cu – 0,07 %; Жамантас III – Pb – 1,0 % (площадь 800?400 м); Жамантас IV – Pb – 0,1, Zn – 0,2 %; Звезда – Pb – 0,3, Zn – 0,6, Cu – 1,0, Mo – 0,03 %; Козерог – скарны с магнетитом, где Pb – 0,1...0,3, Zn – 0,7...1,0, Cu – 0,45, Mo – 0,1...0,3 %; Лазурное II площадью 200?300 м – Pb и Zn – 0,6, Cu – 1,0 %, в отдельных пробах золота до 1,6 г/т; Спутник – Pb – 0,03, Cu – 0,6 %; Белье сопки – Pb до 2, Zn – 11,2, Zn – на глубине 3...5 %. По-видимому, очень перспективной для поисков новых месторождений

полезных ископаемых будет также площадь положительной магнитной аномалии протяженностью около 20 км при ширине около 4 км, зафиксированной западнее свинцово-цинкового рудопроявления Актас, по характеру, структуре и интенсивности достаточно схожей с площадью Каратас-Кокзайской группы месторождений. Геологическая позиция и данные гравиразведки не противоречат этому предположению.

Приведенные фактические материалы свидетельствуют о безусловной перспективности Сарыкум-Жамантас-Актауской группы на поиски скарново-магнетитовых, скарново-грейзеновых и скарново-метаморфизованных медно-порфировых месторождений. Прогнозные ресурсы легкообогатимых железных руд в Сарыкумском, Киматасском, Придорожном, Дуйсеновском, Мушкетовитовом и Бесикжальском месторождениях и рудопроявлениях ожидаются на уровне 80...100 млн т, только в Сарыкумском месторождении суммы металлов меди и свинца ожидаются в объеме около 1,0 млн т, возможно выявление и крупных запасов золота. Предварительные данные по подсчету прогнозных ресурсов показывают, что в этом рудном поле, кроме скарново-магнетитовых руд, могут быть выявлены медные руды в количестве 1,0...1,5, свинца и цинка 2...3 млн т и более чем 40...50 тыс. т молибдена, значительные запасы золота, а также рения и других попутных полезных ископаемых.

Что касается меди, то месторождения ККЗ при ее содержании в первичных рудах в 0,3...0,5 % в ближайшем будущем будут востребованы в связи с практически полным исчерпанием фонда близповерхностных богатых месторождений. По этой причине готовится к отработке: Актогай-Айдарлинская группа месторождений со средним содержанием меди в 0,38 %, к средней величине в 0,35 % пересчитаны относительно богатые руды месторождения Бозшаколь, к среднему содержанию меди 0,4 % приведены запасы крупного месторождения Коксай. Эти примеры позволяют совершенно определенно утверждать об оптимальности отработки медно-порфировых месторождений

Казахстана с уровнем содержания в 0,3...0,5 % даже при дальних расстояниях от перерабатывающих мощностей.

Выводы

Таким образом, при детальном изучении комплексом геолого-геофизических методов в пределах трех рудных узлов Каскырказган-Каратасской зоны могут быть выявлены дополнительно к ценным запасам меди в количестве 6...7 млн т, столько же свинца и цинка, молибдена до 80...100 тыс. т, золота до 100 т, железных руд не менее 100 млн т, которые являются близповерхностными для открытой разработки и самой близкой ресурсной базой Балхашского медеплавильного завода, Конаратского и Каратасского рудников, Вапинского ГОКа. Сложившаяся хорошая и чрезвычайно важная инфраструктура района ККЗ (железнодорожные магистрали, действующие линии электропередач и др.) благоприятствуют подготовке и освоению рекомендуемых объектов. Очень важным является и то, что при разработке месторождений водные ресурсы могут обеспечиваться озером Балхаш и разведанными запасами подземных вод долины рек Токрау, Жамши; для строительства обогатительных фабрик, объектов жилищного и гражданского назначения, отвалов пустых пород имеются неограниченные запасы нерудных полезных ископаемых; в качестве топливно-энергетического сырья для местных нужд пригодны запасы энергетических углей, разведанные и утвержденные в количестве 200 млн т (прогноз 340 млн т).

Приведенные материалы свидетельствуют о необходимости создания Генеральной программы по анализу и обобщению всех материалов геологического содержания с использованием новейших инновационных технологий с задачей решения стратегических вопросов по созданию собственной рудной базы для долгосрочного и стабильного обеспечения сырьем действующих градообразующих и приостановленных предприятий Северного Прибалхашья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошниченко Л.А., Жуков Н.М., Мазуров А.К. Металлогения окраино-континентальных вулканоплутонических поясов Казахстана // Тектоника и мелогения Центральной и Северо-Восточной Азии: Материалы Междунар. конф. – Новосибирск, 2002. – С. 108–109.
2. Беспалов В.Ф. Тектоническая карта Казахской ССР и прилегающих территорий союзных республик масштаба 1:1500000. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 115 с.
3. Королев А.В. Эндеогенное рудообразование в истории развития Земли // Тр. Среднеазиатского политехнического института. – 1959. – Вып. 6. – С. 56–63.
4. Абрамович И.И., Клушин И.Г. Геодинамика и металлогения складчатых областей. – Л: Недра, 1987. – 247 с.
5. Ужкенов Б.С., Акылбеков С.А., Мазуров А.К. Карта аномального магнитного поля Казахстана масштаба 1:1000000. – Кокшетау: Комитет геологии и охраны недр Министерства энергетики минеральных ресурсов, РК, 2004. – 91 с.
6. Минералогическая карта Казахстана масштаба 1:1000000 / С.А. Акылбеков, Э.С. Воцалевский, Л.А. Мирошниченко и др. – Алматы: Институт геологических наук РК, 2007. – 87 с.
7. Карта полезных ископаемых Казахстана масштаба 1:1000000 / Б.С. Ужкенов, С.А. Акылбеков, Г.Р. Бекжанов и др. – Кокшетау: Комитет геологии и охраны недр Министерства энергетики и минеральных ресурсов, РК, 2002. – 188 с.
8. Минералогическая карта Казахстана / Л.А. Мирошниченко, Н.М. Жуков, Х.А. Беспалов и др. // Геология Казахстана. – 2001. – № 3/4. – С. 73–85.
9. Мазуров А.К. Металлогеническое районирование Казахстана // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 33–39.
10. Минеральный и химический состав ультракислых гранитоидов Центрального Казахстана / В.И. Серых, Ю.А. Габов, А.П. Новичкова и др. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 196 с.
11. Сейтмуратова Э.Ю. Позднепалеозойские вулканогенные и вулканогенноосадочные формации Жонгаро-Балхашской склад-

- чатой области (стратиграфия, геолого-петрологические особенности). – Алматы: Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева Министерства образования и науки, РК, 2002. – 254 с.
12. Зональность, сегментированность и палеогеодинамика девонского вулканического пояса Центрального Казахстана / А.М. Курчатов, М.С. Гранкин, Е.Г. Мальченко и др. // Геотектоника. – 2000. – № 4. – С. 32–43.
 13. Дегтярев К.Е. Тектоническая эволюция раннепалеозойской активной окраины в Казахстане. – М.: Наука, 1999. – 123 с.
 14. Месторождения редких металлов и редких земель Казахстана. Справочник / под ред. А.А. Абдулина, Х.А. Беспяева, Э.С. Водялевского и др. – Алматы: Комитет геологии и охраны недр Министерства экологии и природных ресурсов, РК, 1998. – 136 с.
 15. Кунаев М.С., Садыков Д.Ш. Анализ геофизических характеристик ряда месторождений полезных ископаемых Казахстана. – Алматы: Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева Министерства образования и науки, РК, 2007. – 384 с.
 16. Месторождения меди Казахстана. Справочник / под ред. А.А. Абдулина, Х.А. Беспяева, С.Ж. Даукеева и др. – Алматы: Комитет геологии и охраны недр Министерства экологии и природных ресурсов, РК, 1997. – 154 с.
 17. Бекжанов Г.Р. О направлениях геологоразведочных работ на медь в Казахстане // Геология и охрана недр. – 2012. – № 4 (45). – С. 52–54.
 18. Месторождения свинца и цинка Казахстана / под ред. А.А. Абдулина, Х.Ф. Беспяева, Э.С. Водялевского и др. – Алматы: Комитет геологии и охраны недр Министерства экологии и природных ресурсов, РК, 1997. – 152 с.
 19. Урдабаев А.Т. О геофизическом обосновании выбора поисковых участков полиметаллического оруденения на Рудном Алтае // Геология и охрана недр. – 2012. – № 3 (44). – С. 31–39.
 20. Месторождения железа Казахстана. Справочник / под ред. А.А. Абдулина, Х.А. Беспяева, С.Ж. Даукеева и др. – Алматы: Комитет геологии и охраны недр Министерства экологии и природных ресурсов, РК, 1998. – 163 с.
 21. Seltman R., Porter T.M. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: Tectonic, geologic and metallogenic setting and significant deposits // Super porphyry copper and gold deposits: a global perspective. – Australia, Perth: PGC Publishing, 2005. – V. 2. – P. 467–512.

Поступила 17.10.2014 г.

UDC 553.43.+411.+44

KASKYRKAZGAN-KARATASSK ZONE PROSPECTS IN IDENTIFYING COPPER-PORPHYRY, POLYMETALLIC IRON AND GOLD ORE DEPOSITS (CENTRAL KAZAKHSTAN)

Siyazbek A. Akylbekov,

Dr. Sc., Information Service «ATM Consulting» LLP, 205, Panfilov Street, Almaty, 050004, Kazakhstan. E- mail: kaseankz@gmail.com

Mikhail I. Zhukov,

Almaty, Kazakhstan. E- mail: kaseankz@gmail.com

Aleksey K. Mazurov,

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

The relevance of the research is conditioned by the necessity to improve survey efficiency in exploring non-ferrous and noble metal deposits in Kazakhstan ore fields.

The main aim of the research is to analyze, to correlate and to interpret regional geological and geophysical data to determine prospective exploration areas of non-ferrous and noble metal deposits.

Research methods: DSS (deep seismic sounding), observed G-field method of spectral and chemical analysis of core, loaming and channel samplings, as well as geological mapping involving scale 1:200000–10000.

Research results. Kaskirkazgan-Karatassk ore area was identified based on the analysis, correlation and interpretation of regional geological and geophysical data (scale 1:200000–1:50000), including ore mineralization indicators and characteristics. Kaskirkazgan-Karatassk ore area is located in the north-west of Pribalkhashe, close to the major juncture structures forming Atas-Zhongarsk median massif. There are three large ore clusters within this area: (1) Kaskirkazgan-Auzbakensk (KA), (2) Konirat-Borlinsk (KB) and (3) Zhamantas-Karatassk (ZhK). Within the first cluster the ore fields of Kaskirkazgan-Kenkuduk-Kepcham-Auzbakensk deposits have been delineated; in the second area: Konirat-Karatassk-Tortkolsk and Borlinsko-Zapadno-Borlinsko clusters, and in the third area: Sarikum-Zhamantas-aktaysk and Karatassk-Kokzaboy-Koskuduk-Minshunkursk clusters. More than 40 deposits and occurrences of copper, lead zinc, molybdenum, wolframite and iron were found within this area. It was proven that special consideration should be focused on the exploration of granodiorite and granite-granodiorite massifs, which, in their turn, are allied with copper-porphyrific occurrences. Not only potential mineralization areas, but also areas of maximal occurrence of hydrothermal processes, from alkaline to ultra-felsic, as oxidized ore «gossans» were determined by geophysical and geochemical methods. The studied area embraces significant reserves of copper, poly-metals and other minerals, associated with upper mantle grade surface zones.

Key words:

Lineaments, asthenosphere, geodynamics, caldera, megashotkverk, ore zones, nodes, fields, resources, innovation, General program, Northern Balkhash.

REFERENCES

- Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M., Mazurov A.K. Metallogeniya okraino-kontinentalnykh vulkano-plutonicheskikh pojasov Kazakhstana [Metallogeny of marginal continental volcanic belts in Kazakhstan]. *Tektonika i melogeniya Tsentralnoy i Severo-Vostochnoy Azii: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of International conference. Tectonics and melogenic in Central and Northern-Eastern Asia]. Novosibirsk, 2002. pp. 108–109.
- Bespalov V.F. *Tektonicheskaya karta Kazahskoy SSR i prilgayushchikh territoriy soyuznykh respublik masshtaba 1:1500000* [Tectonic map of Kazakh SSR and surrounding areas of the Union Republics on 1:1500000]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1976. 115 p.
- Korolev A.V. Endogennoe rudoobrazovanie v istorii razvitiya Zemli [Endogenic ore formation in the Earth evolution]. *Trudy Sredneaziatskogo politehnicheskogo instituta*, 1959, Iss. 6, pp. 56–63.
- Abramovich I.I., Klushin I.G. *Geodinamika i metallogeniya skladchatykh oblastey* [Geodynamics and metallogeny of fold areas]. Leningrad, Nedra Publ., 1987. 247 p.
- Uzhkenov B.S., Akyilbekov S.A., Mazurov A.K. Karta anomalno-magnitnogo polya Kazakhstana masshtaba 1:1000000 [The map of the anomalous magnetic field of Kazakhstan on 1:1000000]. Kokshetau, Committee of geology and resources conservation of the Ministry of Energy and mineral resources, 2004. 91 p.
- Akyilbekov S.A., Votsalevsky E.S., Miroshnichenko L.A. *Mineragenicheskaya karta Kazakhstana masshtaba 1:1000000* [on 1:1000000]. Almaty, Institut geologicheskikh nauk RK, 2007. 87 p.
- Uzhkenov B.S., Akyilbekov S.A., Bekzhanov G.R. *Karta poleznykh iskopayemykh Kazakhstana masshtaba 1:1000000* [Kazakhstan mineral resources map on 1:1000000]. Kokshetau, Committee of geology and resources conservation of the Ministry of Energy and mineral resources, 2002. 88 p.
- Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M., Bespaev H.A. Mineragenicheskaya karta Kazakhstana [Minerogenic map of Kazakhstan]. *Geologiya Kazakhstana*, 2001, no. 3/4, pp. 73–85.
- Mazurov A.K. Metallogenicheskoe rayonirovanie Kazakhstana [Metallogenic zonation of Kazakhstan]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 33–39.
- Serykh V.I., Gabov Yu.A., Novichkova A.P. *Mineralny i khimichesky sostav ultrakislykh granitoidov Tsentralnogo Kazakhstana* [Mineral and chemical composition of ultra-acid granitoids of Central Kazakhstan]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1976. 196 p.
- Seytmuratova E.Yu. *Pozdnepaleozoyskie vulkanogennyye i vulkanogennoosadochnyye formatsii Zhongaro-Balhashskoy skladchatoy oblasti (stratigrafiya, geologo-petrologicheskie osobennosti)* [Late Paleozoic volcanic and volcano-sedimentary formations of Zhongar-Balkhash folded area (stratigraphy, geological and petrological features)]. Almaty, K.I. Satpaev Institute of geological sciences of the Ministry of Education and Science, RK, 2002. 254 p.
- Kurchavov A.M., Grankin M.S., Malchenko E.G. Zonalnost, segmentirovannost i paleogeodinamika devonskogo vulkanicheskogo poiyasa Tsentralnogo Kazakhstana [Zonation, segmented system and paleogeodynamics of Devonian volcanic belt in Central Kazakhstan]. *Geotektonika*, 2000, no. 4, pp. 32–43.
- Degtyarev K.E. *Tektonicheskaya evolyutsiya rannepaleozoyskoy aktivnoy okrainy v Kazakhstane* [Tectonic evolution of early Paleozoic active margin in Kazakhstan]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 123 p.
- Mestorozhdeniya redkikh metallov i redkikh zemel Kazakhstana. Spravochnik* [Deposits of rare metals and rare soils in Kazakhstan. Handbook]. Eds. A.A. Abdulin, Kh.A. Bespaev, E.S. Votsalevsky. Almaty, Committee of geology and resources conservation of the Ministry of Energy and mineral resources, 1998. 136 p.
- Kunaev M.S., Sadykov D.Sh. *Analiz geofizicheskikh kharakteristik ryada mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Kazakhstana* [Analysis of geophysical characteristics of some mineral deposits in Kazakhstan]. Almaty, K.I. Satpaev Institute of geological sciences of the Ministry of Education and Science, RK, 2007. 384 p.
- Mestorozhdeniya medi Kazakhstana. Spravochnik* [Copper deposits in Kazakhstan. Handbook]. Eds. A.A. Abdulin, H.A. Bespaev, S.Zh. Daukeev. Almaty, Committee of geology and resources conservation of the Ministry of Energy and mineral resources, 1997. 154 p.
- Bekzhanov G.R. O napravleniyakh geologorazvedochnykh rabot na med v Kazakhstane [The directions of copper explorations works in Kazakhstan]. *Geologiya i okhrana nedr*, 2012, no. 4 (45), pp. 52–54.
- Mestorozhdeniya svintsa i tsinka Kazakhstana* [Lead and zinc deposits in Kazakhstan]. Eds. A.A. Abdulin, Kh.F. Bespaev, E.S. Votsalevsky. Almaty, Committee of geology and resources conservation of the Ministry of Energy and mineral resources, 1997. 152 p.
- Urdabaev A.T. O geofizicheskoy obosnovanii vybora poiskovykh uchastkov polimetallicheskogo orudneniya na Rudnom Altaye [On geophysical substantiation of selecting exploration permit of polymetallic mineralization in Rudny Altay]. *Geologiya i okhrana nedr*, 2012, no. 3 (44), pp. 31–39.
- Mestorozhdeniya zheleza Kazakhstana. Spravochnik* [Iron deposits in Kazakhstan. handbook]. Eds. A.A. Abdulin, Kh.A. Bespaev, S.Zh. Daukeev. Almaty, Committee of geology and resources conservation of the Ministry of Energy and mineral resources, 1998. 163 p.
- Seltman R., Porter T.M. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: Tectonic, geologic and metallogenic setting and significant deposits. *Super porphyry copper and gold deposits: a global perspective*. Australia, Perth, PGC Publishing, 2005. Vol. 2, pp. 467–512.

Received: 17 October 2014.

УДК 622.243

АНАЛИЗ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БУРЕНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН НА ТАЛНАХСКОМ РУДНОМ УЗЛЕ

Нескоромных Вячеслав Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой бурения технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: sovair@bk.ru

Неверов Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент каф. бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: neveroff_man@mail.ru

Рожков Владимир Павлович,

д-р техн. наук, профессор каф. бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Каратаев Дмитрий Давидович,

начальник производственно-технологического отдела, ООО «Норильскгеология», Россия, 663330, г. Норильск, а/я 889.
E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Неверов Александр Александрович,

магистрант каф. технической физики Института космических исследований и высоких технологий ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», Россия, 660014, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: aaneverov@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью бурения геологоразведочных скважин для осуществления поисков богатых медно-никелевых руд на глубоких горизонтах и флангах Талнахского рудного узла.

Цель работы: анализ геолого-технических условий бурения глубоких скважин на Талнахском рудном узле, аналитические исследования образцов горных пород для последующей разработки технологии строительства скважин с применением комплексов со съемными керноприемными трубами.

Методы исследования: визуальное описание керна, аналитические исследования с применением методов рентген-флуоресцентной спектроскопии, электронной микроскопии, рентгеноспектрального, спектроскопического и томографического анализа для определения минерального состава глинистых горных пород; лабораторные тестовые испытания образцов хлоритизированных горных пород; расчеты потерь давления при бурении КССК с полимерными растворами.

Результаты. Анализ и исследование геологического материала Талнахского рудного узла показали, что неустойчивость стенок скважин связана с напряженным состоянием горного массива и со специфическим минеральным составом материалов, заполняющих трещины рудных зон и слагающих стенки скважин в осадочных толщах. Аналитические исследования показали, что образцы горных пород представляют пористую смесь (0,1–5 мкм) кристаллических и аморфных минералов. Разрушение аргиллитов и обрушение габбро-долеритов при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе связано с их минеральным составом, в частности с наличием хлорита и монтмориллонита. Вода проникает в микропоры и микротрещины, способствуя раскрытию трещин, гидратации глинистых минералов с образованием площадок скольжения и, как следствие, приводит к разрушению. Расчет потерь давления показал, что необходимо разрабатывать алмазные коронки с наружным диаметром 80–82 мм для бурения комплексами КССК в сложных горно-геологических условиях Талнахского рудного узла.

Ключевые слова:

Геологический материал, глинистый минерал, хлорит, габбро-долерит, устойчивость стенок скважины, напряженное состояние горного массива, потери давления.

Введение

В месторождениях Норильского района сосредоточены запасы никеля, сопоставимые с районом Садбери; при этом Норильск и Садбери далеко превосходят все другие месторождения и рудные районы. Кроме того, Норильские месторождения содержат огромные запасы элементов платиновой группы (ЭПГ), уступая лишь месторождениям Бушвельдского комплекса и, возможно, Великой Дайке Зимбабве. Это делает их уникальными: они являются важным источником и никеля, и ЭПГ (а также меди и кобальта), а не одного из названных металлов. Очень важно также, что Норильские месторождения превосходят все другие (и медно-никелевые, и платино-металльные) по стоимости тонны руды. Огромные запасы Норильского района сосредоточены, в основном, в Талнахском рудном узле (ТРУ), на площади 8×18 км, по сравнению с площадью Садбери 30×60 км и Бушвельда 280×450 км [1].

Интенсивная эксплуатация сульфидных платино-медно-никелевых руд месторождений Норильского рудного района и, прежде всего, богатых сульфидных руд привела к существенному изменению качественного состава рудного сырья, поступающего на обогатительно-металлургическую переработку. Именно ускоренное выбывание богатых сульфидных руд приводит к росту относительной доли бедных и труднообогатимых типов руд. Подобное диспропорционирование качества рудного сырья обуславливает появление в числе особо актуальных научно-технических задач получение наиболее полных данных по качеству рудного сырья, способных существенно повлиять на показатели извлечения промышленных компонентов, особенно – благородных металлов [2]. Выполненное изучение руд месторождения Норильск I выдвигает новую весьма актуальную задачу по исследованию особенностей состояний ЭПГ и их распределения в аналогичных рудах Талнахского рудного поля.

Актуальность этого определяется, прежде всего, тем, что запасы ЭПГ в Талнахском интрузиве огромны. Однако при традиционных подходах к экономической оценке этих руд в ряде случаев высказываются соображения о неэффективности их разработки в современных условиях. Задача становится тем более актуальной, поскольку выбор направлений дальнейшего развития (или неразвития) рудников Талнахского рудного поля является проблемой, требующей сегодняшнего решения. Вместе с тем проблема эффективного использования вкрапленных руд Талнаха на основе имеющихся данных представляется не столь очевидной по сравнению с месторождением Норильск I. Талнахские вкрапленные руды несколько беднее по содержаниям суммы ЭПГ. Допущение их потерь при традиционном обогащении действительно может сделать эти руды нерентабельными. Возможным решением проблемы может стать переоконтуривание рудных тел на основе параметров их пла-

тиносности и эффективности извлечения различных форм нахождения ЭПГ.

Переоконтуривание и поиски богатых медно-никелевых руд на глубоких горизонтах и флангах ТРУ осуществляется посредством бурения геолого-разведочных скважин глубиной более 1500 м. При бурении скважин возникают проблемы, связанные с поддержанием стенок скважин в устойчивом состоянии. Поддержание устойчивости стенок скважины является одной из основных задач, которые приходится решать при бурении глубоких скважин. Различные формы неустойчивости ствола, возникающей в результате взаимодействия между буровым раствором и глинистыми формациями, обязательно связаны с явлениями гидратации [3].

Целью данной работы является анализ геолого-технических условий бурения глубоких скважин на ТРУ для последующей разработки технологии строительства скважин.

Геологические особенности Талнахского рудного узла

Территория Талнахского рудного узла хорошо изучена по вопросам геологического строения [4–10] до глубин порядка 1000–1500 м и на большей части ограничена девонским уровнем. В геологическом строении территории принимают участие осадочные отложения, характеризующие лагунно-морские, континентальные и переходные между ними обстановки осадконакопления, широким распространением пользуются магматические образования эксплозивной, эффузивной и интрузивной фаций траппов. В геологическом разрезе выделяются три самостоятельные литологические толщи пород: туфолавовый комплекс пермо-триаса, глинисто-песчаные угленосные отложения пермо-карбона (тунгусская серия пород) и глинисто-карбонатные, сульфатно-карбонатные отложения морского палеозоя (ордовик-силур-девон), в кровле которых отмечается крупный предтунгусский размыв.

Талнахский рудоносный интрузив располагается в толщах пород морского и лагунно-континентального палеозоя. Рудовмещающие горизонты Талнахского рудного узла слагают юго-западный фланг Хараелахской мульды, рассеченной с севера на юг Норильско-Хараелахским разломом – основной рудоконтролирующей структурой района. К востоку от разлома породы характеризуются относительно спокойным залеганием. К западу от разлома породы геологического разреза вовлечены в интенсивную тектонику, обусловленную преимущественной разрядкой напряжений в условиях стресса северо-западного направления, в полосе шириной 5–7 км тектоно-магматической грабен-синклинали. Грабен-синклиналь образована серией западных сбросов, ориентированных вдоль Главного шва Норильско-Хараелахского разлома и наклоненных в его сторону под углом 40–60°. Наряду с крупными субмеридиональными сбросами на площади широко развиты более мелкие дизъюнктивные нарушения северо-западного прости-

рания и амплитудой смещения в пределах первых десятков метров. Сочетание сбросовых структур формирует сложное мозаично-блоковое строение геологического плана площади с образованием клиновидных бескерновых просадочных структур, совпадающих в плане с положительными пликативными структурами и крупными интрузивными телами.

Таким образом, просадочные структуры являются следствием гравитационной разрядки в зонах растяжения над сводовыми частями поднятий. Талнахский рудный узел включает Талнахское и Октябрьское месторождения, которые связаны с крупной дифференцированной интрузией габбро-долеритов. Сульфидное оруденение приурочено к низам интрузии и представлено тремя видами руд: сплошных, вкрапленных и прожилково-вкрапленных в породах, вмещающих интрузию («медистые») [11]. По преобладающему минералу различают пирротиновые, халькопиритовые (с талнахитом и моихукитом), кубанитовые и борнитовые (с халькозинном) руды. Сплошные руды образуют больше десятка пологопадающих линзо- и пластообразных залежей мощностью до 50 м. Они локализируются по нижнему контакту интрузии, реже в ее приподошвенной части или в подстилающих породах. Форма залежей относительно простая, осложненная мелкими сбросами или послойным расщеплением на флангах. Контакты сплошных руд обычно четкие, относительно ровные в кровле и осложненные апофизами и прожилками в почве. Прочность связи по контакту с метаморфизованными осадочными породами довольно значительна, контакт с габбро-долеритами нередко ослаблен хлоритовой зоной мощностью 3–10 см. «Медистые» руды образуют многочисленные относительно небольшие тела с прихотливыми очертаниями в плане и с резко меняющейся мощностью, достигающей 40 м. Они расположены над или под сплошными рудами, в измененных осадочных породах, иногда выше интрузии. Контакты нерезкие, неровные, прочные; со сплошными рудами и вмещающими породами граница четкая, нередко ослабленная присутствием хлорита.

Для ТРУ характерно интенсивное проявление разрывной тектоники различных порядков и связанной с этим трещиноватости. Наиболее трещиноваты рассланцованные породы тунгусской серии, наименее – толстоплитчатые карбонаты девона. Ниже отметки 700 м руды и породы отнесены к удароопасным. По степени трещиноватости руды и породы ТРУ делятся на четыре категории от слабо-трещиноватых до раздробленных, характеризующихся средним размером ребра элементарного блока от $\leq 0,2$ до $\leq 0,05$ м. В осадочных породах чаще всего встречаются пологие трещины, в сплошных рудах крутопадающие. Трещины чаще всего заполнены глинистыми минералами типа хлорита, гидрослюд, смешанослойными образованиями. С приближением к структурному нарушению трещиноватость пород увеличивается, образуя зо-

ну повышенной трещиноватости шириной равной 0,2–0,5 амплитуды смещения по данному разлому. Как правило, такие зоны ассиметричны: мощность зоны в висячем боку нарушения в 3–8 раз больше, чем в лежащем. Зоны высокой или повышенной трещиноватости мощностью до 5 м отмечены в кровле и реже в почве сплошных руд [12].

Методика аналитических исследований образцов горных пород

Для уточнения вещественного состава осадочных горных пород были отобраны 29 образцов керна аргиллита и хлорита с 5 скважин (ЗФ-53, ЗФ-56, ЗФ-48, РТ-11, РТ-17), глубина отбора 886–1565 м. Исследование вещественного состава и строения пород разведочнинской свиты и тунгусской серии проводилось в КНЦ СО РАН и Институте горного дела, геологии и геотехнологий СФУ. Определение элементного состава проводилось на рентген-флюоресцентном спектрометре BRUKER S2 Ranger (детектируемые элементы с Na до U). Электронно-микроскопическое изучение и микроанализ выполнены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM3000 с рентгеноспектральным анализатором BRUKER XFlash 430 H (детектируемые элементы от В до Am). Порошковые дифрактограммы образцов были сняты на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (линейный детектор VANTEC, $\text{Cu-K}\alpha$ излучение). Микроскопические исследования в проходящем свете выполнены с использованием микроскопа Axioskop 40 A Pol. Спектроскопический и томографический анализы были выполнены с помощью ЯМР микро-томографа на основе Bruker AVANCE DPX 200. Для получения спектров по ядрам ^1H и томографических изображений образцы распиливались сухим пилением до параллелепипедов нужных размеров ($20 \times 20 \times 30$ мм). Для исследований взаимодействия с водой образцы помещались вертикально в контейнер с дистиллированной водой с глубиной погружения 3 мм.

Визуальные исследования отобранных образцов горных пород

Разведочнинская свита (D_1 rz) с незначительным размывом залегает на подстилающих породах и представлена чередованием пачек фосфоритоносных черных, серых, зеленовато-серых и коричневатых (до шоколадных) аргиллитов с линзами черных доломитов и известняков, включениями фосфоритов. В основании полимиктовые песчаники. Мощность свиты 40–250 м.

Тунгусская серия (C_2 – P_2) объединяет достаточно мощную толщу верхнепалеозойских угленосных отложений, с угловым и стратиграфическим несогласием залегающую на образованиях морского палеозоя и подстилающую вулканогенно-осадочный комплекс пермо-триаса. По совокупности органических остатков и вещественному составу тунгусская серия подразделяется на шесть свит: адылканскую и талнахскую, объединяемые по сте-

пени угленасыщенности в непродуктивную (слабоугленосную) толщу, и далдыканскую, шмидтинскую, кайерканскую, амбарнинскую продуктивную (угленосную) толщу. Адылканская свита представлена переслаивающимися алевролитами, аргиллитами, песчаниками с прослоями угля и конгломератов; отложения амбарнинской свиты содержат существенное количество туфогенного материала. В интервале глубин, соответствующем глубине залегания изучаемых отложений, естественная обводненность практически отсутствует, что подтверждено бурением многочисленных скважин и особенно проходкой горных выработок на медно-никелевых месторождениях Норильска и Талнаха.

Визуальный осмотр образцов разведочной свиты показал следующее:

- 1) Аргиллиты (шоколадно-коричневого, зеленовато-серого, пепельно-серого и серого цветов), метаморфизованные с многочисленными зеркалами и бороздами скольжения. Трещиноватость открытого типа, преимущественно под углом 20–30° к горизонту. Стенки трещин неровные, бугристые с корочками белого ангидрита и плёнками хлорита и серпентин-хлоритового материала. Встречаются единичные волосовидные прожилки того же состава субвертикального направления и единичные прожилки розоватого ангидрита, ориентированные под углом 10–15° к горизонту мощностью 2–3 мм. Контакт с нижележащими породами резкий по трещине под углом 50–60°, линия контакта волнистая. Наблюдается множество зеркал и борозд скольжения;
- 2) Долериты зелёного, зеленовато-серого, серого до тёмно-серого, тонко-зернистого, брекчиевидного облика изменены, хлоритизированы. В верхней части слоя отмечаются редкие мелкие (1–5 мм) миндалины, преимущественно округлой и овальной формы, заполненные белым кварцем в хлоритовой оторочке. Трещиноватость сильная. Преобладают трещины закрытого типа. Порода пронизана множеством прожилков различного направления. Мощность их от волосовидных до 1–1,5 см. Часто трещины взаимно пересекаются, и порода приобретает брекчированную текстуру. Преобладают трещины под углом 70–80° к горизонту. Выполнены они белым кварцем, часто с мелкими обломками вмещающих пород. По периферии вдоль трещин порода более изменена, осветлена.

Визуальный осмотр образцов тунгусской серии показал следующее:

- 1) алевролиты от серого до пепельно-серого цвета метаморфизованные, тонко-плитчатые, хлоритизированные, сланцеватые. По напластованию плиток отмечаются мелкие плохо сохранившиеся отпечатки флоры, мелкие чешуйки слюды и мелкая вкрапленность пирита. В верхней части слоя мощностью 10 см каменный уголь чёрный блестящий представлен тремя

плитками мощностью 2,0–2,5 см. Трещиноватость сильная, керн представлен мелкими оскольчатыми обломками. Переход к нижележащим породам резкий;

- 2) аргиллиты углистые чёрного цвета тонкоплитчатые с обилием отпечатков обуглившегося детрита. Встречаются редкие гнёзда пирит-марказита округлой формы размером до 1,5 см в диаметре. Породы метаморфизованные с множеством зеркал скольжения. Трещиноватость пород весьма сильная, трещины открытого типа. Переход к нижележащим породам постепенный;
- 3) долериты тёмно-серого цвета, тонкозернистые интенсивно-трещиноватые. Керн представлен обломками в виде щебня и дресвы, значительно реже – столбиками размером 5–7 см. В столбиках отмечаются ломаные волосовидные прожилки белого кальцита. По стенкам трещин открытого типа отмечаются плёнки серпентин-хлоритового материала, корочки белого кальцита, а также зеркала и борозды скольжения. К трещинам приурочена вкрапленность пирита в виде примазок, тонких (1–2 мм) прожилков. Значительно реже вкрапленность пирита отмечается в основной массе в виде гнёзд округлой формы размером до 1 см в диаметре. Контакт с нижележащими породами резкий, линия контакта разбурена в процессе бурения.

Визуальный осмотр образцов рудной зоны показал следующее:

- 1) Габбро-долериты такситовые тёмно-серого цвета с зеленоватым оттенком мелко- и среднезернистые изменены, перематы, хлоритизированы. Сульфидное оруденение (пирротин, халькопирит) преимущественно в виде гнёзд неправильной формы размером до 1,5–2,0 см в поперечнике. Значительно редко встречаются гнёзда округлой формы с чётким разделением на халькопиритовые и пирротиновые разности. Оруденение составляет примерно 10–15 % объёма породы. Трещиноватость пород сильная, различного направления. Преобладают трещины открытого типа, по стенкам которых отмечается серпентин-хлоритовый материал и молочно-белый кальцит. Отмечаются зеркала и борозды скольжения. Керн представлен столбиками длиной 3–5 см и редко столбиками мощностью 10–15 см. Переход к нижележащим породам резкий.
- 2) Габбро-долериты контактовые тёмно-серого цвета тонко- и мелкозернистые, массивной текстуры. Сульфидная вкрапленность сравнительно редкая в виде мелких гнёзд неправильной формы размером до 1 см. Единичные, округлой формы, достигают 2,5 см в диаметре. Встречаются ксенолиты вмещающих пород. Трещиноватость пород сильная, различного направления. Преобладают трещины открытого типа с плёнками серпентин-хлоритового материала. Единичные трещины выполнены молочно-бе-

лым кальцитом. Отмечаются зеркала и борозды скольжения. Контакт с нижележащими породами резкий. Линия контакта истёрта в процессе бурения.

Аналитические исследования отобранных образцов горных пород

В табл. 1 представлены результаты исследования отобранных образцов горных пород.

Таблица 1. Минеральный состав изученных образцов по результатам рентгенфлуоресцентного и рентгенофазового анализа

Fig. 1. Mineral composition of the samples by the results of X-ray fluorescence and X-ray phase analyses

№ образца/Глубина отбора, м Sample/Sampling depth, m	Содержание минералов, % Mineral content, %								Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
	Кальцит Calcite	Кварц Quartz	Мусковит Mirror stone	Шамозит* Chamosite	Пирит Pyrite	Доломит Dolomite	Анортит Anorthite		
6/1016	0	27,6	64,2	6,3	0	0	1,8	2,783	
9/886	2,1	26,5	64,4	5,6	0	0	0,6	2,778	
10/898	0	8,3	63,9	3,4	0	20,8	2,5	2,845	
12/927	0	21,1	59,8	11,7	0,96	0	6,4	2,843	
13/949	0	19,3	57,8	19,3	0,17	0	3,4	2,84	
14/954	0	17,6	66,4	13,2	0,63	0	2,2	2,836	
15/962	0	13,9	77	7,2	0,65	0	1,3	2,812	
18/1095	0,16	25,3	50,8	14,1	0	0	9,6	2,798	
20/989	5,38	21,5	65,3	6	0,41		1,5	2,807	
21/996	0,61	43	38,3	6,5	0	0	11,5	2,757	

Примечание: *Шамозит – глинистый минерал, относящийся к подклассу листовых.

Note: *Chamosite is a clay mineral in laminal subclass.

По результатам микроскопического (оптического и СЭМ) и рентгенофазового анализа для аргиллитов разведочнической свиты характерно содержание мусковита (50–77 %), кварца (8–28 %), шамозита и монтмориллонита (1–19 %, определялись совместно), плагиоклаза (0–6,4 %). Ориентировка слоистых силикатов (мусковит, шамозит, монтмориллонит) субпараллельная слоистости, благодаря чему аргиллиты обладают пониженной устойчивостью к сдвиговым деформациям вдоль плоскости их ориентировки (рис. 1). С учётом высокого литостатического давления, связанного с глубиной залегания, это может являться одной из причин разрушения ствола скважин. Необходимо отметить, что увеличение количества кварца и полевых шпатов, как и увеличение размеров частиц этих минералов, уменьшает пластичность пород и повышает их устойчивость.

Свойства глинистых пород, представленных смешанно-слоистыми соединениями, обусловлены их структурами. Во всех образцах обнаружена фаза монтмориллонита, которая определяет коллоидно-химическую активность, набухание, способность к повышенной гидратации [13–16]. Способ-

ность к набуханию подтверждено дополнительными рентгеновскими исследованиями на нескольких исследуемых образцах. При пропитке их водой или, наоборот, при нагревании и испарении воды рефлексы фазы монтмориллонита смещаются относительно рефлексов шамозита, указывая на изменение кристаллической решетки и внедрение/выход молекул воды из решетки кристаллов. По результатам рентгенофазового анализа весовая доля монтмориллонита составляет 3–10 %. Р. Грим [17] показал, что примеси монтмориллонита (~5 %) в глинах различного состава обуславливают сильное увеличение верхних пределов пластичности. Беспорядочное чередование этих минералов в глинистой породе чревато осложнениями в скважине.

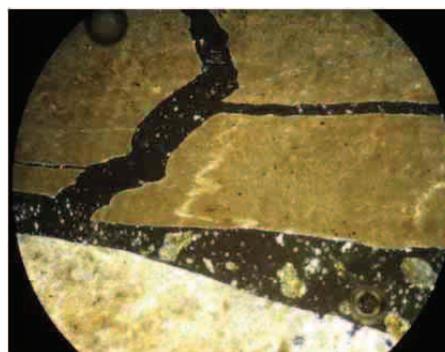


Рис. 1. Прожилки плейчатого облика (светлые извилистые линии), возникшие при неравномерном проскальзывании пакетов аргиллита. Ширина поля зрения 2,2 мм, николи скрещены

Fig. 1. Fibers of puckered habitus (light curved lines) occurred at inhomogeneous sliding of mudstone system. Field width is 2,2 mm, crossed nicols

Для отложений тунгусской серии по результатам микроскопического (оптического и СЭМ) и рентгенофазового анализа характерно преобладание мусковита (38–65 %), кварца (21–43 %), плагиоклаза (2–12 %), шамозита и монтмориллонита (6–15 % по результатам рентгенофазового анализа). Содержание углистого вещества составляет до 25 %. Алевролиты, аргиллиты и песчаники часто обнаруживают тонкое переслаивание с мощностью прослоев от первых мм. Особенности состава и строения изученных горных пород определяют их поведение при бурении. Одним из основных факторов снижения устойчивости пород тунгусской серии является значительное количество углистого вещества. Также устойчивость горных пород, как и в ситуации с отложениями разведочнической свиты, снижается благодаря возрастанию содержания слоистых силикатов (мусковит, шамозит, монтмориллонит). На рис. 2 представлен фрагмент алевролита в углистом аргиллите.

Анализ лабораторных исследований образцов горных пород показал:

1) Образцы представляют собой пористую смесь как кристаллических, так и аморфных минералов.



Рис. 2. Тектонически замятые и окатанные фрагменты алевролита в углистом аргиллите. Ширина поля зрения 2,30 мм, николи не скрещены

Fig. 2. Tectonically contorted and rounded fragments of siltstone in carbonic mudstone. Field width is 2,30 mm, nicols are not crossed

2) В образцах содержатся следующие основные фазы: очень мелкие кристаллы мусковита, крупные кристаллы кварца и шамозит (хлорит).

3) Во всех образцах обнаружена фаза монтмориллонита, которая способна к сильному набуханию в воде. Способность к набуханию подтверждена дополнительными рентгеновскими исследованиями на нескольких исследуемых образцах. При пропитке их водой или, наоборот, при нагревании и испарении воды рефлексы фазы монтмориллонита смещаются относительно рефлексов шамозита, указывая на изменение кристаллической решетки и внедрение/выход молекул воды из решетки кристаллов. По результатам рентгенофазового анализа весовая доля монтмориллонита составляет 1–10 %.

4) Вода присутствует как в свободном, так и в кристаллическом состояниях.

5) По результатам спектроскопического и томографического анализов все образцы были разделены на три группы: А) водоупорные образцы, проникновение воды внутрь образца не обнаруживается на спектрах и на томографических изображениях, вода представлена в свободном (поры) и связанном состояниях (образец № 20/989). Проникновение воды в данный тип образцов не происходит даже при длительном выдерживании (168 ч) в водной среде, эффективная пористость по остаточной воде ($P_{ост}$), находившейся в образце до пропитывания, совпадает с эффективной пористостью (P). Диапазон изменения P для образцов первой группы составляет 1,2–1,6 %. При длительной выдержке в воде P не изменяется в пределах погрешности эксперимента; Б) пропитываемые образцы, проникновение воды внутрь образца обнаруживается на спектрах и на томографических изображениях, вода представлена в свободном (поры) и связанном состояниях (образец № 6/1016). Однако содержание свободной воды в поровом пространстве здесь выше, образцы являются более рыхлыми. Эффективная пористость по остаточной воде лежит в диапазоне от 1,6 %. В отличие от первой группы, данные образ-

цы пропитываются водой. При этом эффективная пористость может достигать значений 2,3–2,7 %; В) разрушаемые образцы, проникновение воды внутрь образца сопровождается набуханием и разрушением его цельности, вода представлена в свободном (поры), связанном и гелевом состояниях (образец № 15/962). Диапазон ($P_{ост}$) составляет 1,4–1,6 %. Однако при пропитывании водой наблюдается интенсивное разрушение образцов в течение первых 30 мин., с расщеплением на тонкие длинные слои (образец № 15/962). Разрушение также происходит и в концентрированных водных растворах солей NaCl, NaF через 4–5 ч. В отличие от образцов первой и второй групп, при пропитывании образцов третьей группы на ЯМР 1H спектрах появляется небольшая по интенсивности третья компонента, которая представляет собой промежуточное состояние воды, характеризующее по ширине линии как гелевое (поверхностно-связанное). Данный тип воды характерен для материалов, в которых происходит включение (связывание) воды в структуру (поверхность) со значительной потерей ее подвижности, однако без образования жестких связей (как в связанном состоянии). Доля такой воды не превышает 4,4 % от общего количества (образец № 15/962). Гидратация образцов 3 группы приводит к появлению третьего состояния, присутствующего в образце воды (помимо свободного и связанного), близкого по свойствам к воде в монтмориллонитовой глине.

Разрушение аргиллитов и хлоритизированных габбро-долеритов при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе связано с их минеральным составом. Вода проникает в микропоры и микротрещины, способствуя раскрытию трещин, гидратации глинистых минералов с образованием площадок скольжения и как следствие приводит к разрушению. Наличие тектонических зон снижает устойчивость пород вне зависимости от их минерального состава.

Напряженное состояние горного массива

В пределах Талнахского рудного узла, на основе натуральных измерений, проведенных рядом исследователей [18, 19], установлен сложный характер полей напряженностей и выявлены закономерности их распределений:

- 1) неоднородность поля естественных напряжений горных массивов связана с морфоструктурами района;
- 2) неоднородность поля естественных напряжений обусловлена наличием крупных тектонических зон, а вне зон их влияния – петрогенетическими особенностями пород геологического разреза;
- 3) при переходе от слаботрециноватых пород к средне- и сильнотрециноватым наблюдается снижение (≈ 20 –30 %) величин естественных напряжений;
- 4) фоновые значения вертикальных и горизонтальных напряжений для всей структуры Тал-

нахского рудного узла на 13–14 МПа превышают расчетные напряжения, обусловленные весом вышележащих пород. Поэтому можно ожидать увеличения напряжения горного массива и возникновения горных ударов в прочных и крепких породах на глубинах более 700 м, где величины естественных напряжений сопоставимы или превышают прочность горных пород. Преимущественно горные удары проявляются в слаботрещиноватых породах с жесткими кристаллизационными связями, характеризующимися хрупким разрушением, это интрузивные породы – габбро-долериты различного состава. Зоны концентрации напряжения, вызывающие горные удары в любой форме, отмечаются, как правило, на участках слаботрещиноватых пород, в пределах контура рудоносной габбро-долеритовой интрузии, особенно вблизи контактов с вмещающими осадочными породами. Величина напряжения на глубине залегания рудоносной интрузии колеблется от 35 до 69 МПа. Шовные зоны тектонических нарушений характеризуются минимальными значениями напряжений и низкими значениями показателей деформационных свойств слагающих пород. Высокая степень нарушенности этих массивов очень сильно влияет на устойчивость стенок скважин при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе и становится причиной возникновения обрушений и вывалов.

Всё вышеописанное также относится и к сульфатно-карбонатным отложениям силура-девона, тоже залегающим на больших глубинах. Установлено, что ниже 1000 м увеличивается хрупкость горных пород, таких как мергели и доломиты, что приводит к динамическим проявлениям горного давления (горным ударам). Габбро-долериты и метаморфизованные породы (роговики, метаморфизованные доломиты и известняки) изначально относятся к жестким породам и тем более склонны к подобным проявлениям. Ещё одной причиной, делающей неустойчивыми в стенках выработок такие породы, как аргиллиты и в меньшей степени мергели, являются свойственные им максимальные деформации свободной разгрузки, снижающие показатели прочности на 40–45 % и упругие показатели на 30–35 % [18].

Выводы

1. Анализ и исследование геологического материала Талнахского рудного узла показал, что неустойчивость стенок скважин связана с напряженным состоянием горного массива и со специфическим минеральным составом материала, заполняющего трещины рудных зон и слагающего стенки скважин в осадочных толщах.
2. Аналитические исследования показали, что образцы горных пород представляют пористую смесь (0,1–5 мкм) кристаллических и аморфных минералов.

3. Во всех представленных образцах обнаружен монтмориллонит.
4. Рудоносные габбро-долериты мелко- и среднезернистые изменены, перемяты, хлоритизированы.
5. Разрушение аргиллитов и обрушение габбро-долеритов при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе связано с их минеральным составом, в частности, с наличием хлорита и монтмориллонита. Вода проникает в микропоры и микротрещины, способствуя раскрытию трещин, гидратации глинистых минералов с образованием площадок скольжения и, как следствие, приводит к разрушению. Наличие тектонических зон снижает устойчивость пород вне зависимости от их минерального состава.
6. В работе [3] показано влияние гидродинамического давления на устойчивость стенок скважины. Теоретически и практически было доказано, что создаваемый буровым раствором градиент гидродинамического давления может значительно влиять на устойчивость ствола. Объемная скорость и направление течения в порах пласта определяются перепадом давления Δp , или разностью давления, создаваемого столбом бурового раствора p_w , и пластовым давлением, т. е. $\Delta p = p_w - p_f$. В момент вскрытия пласта Δp действует на стенки скважины, но с течением времени градиент давления распространяется и на поровое пространство пласта. По достижении условий равновесия поровое давление p_f на любом радиальном расстоянии от оси скважины определяется с помощью хорошо известного уравнения радиального течения [19]. Стабилизирующее действие положительного перепада давления, развиваемого буровым раствором, намного сильнее, если в стволе скважины находится буровой раствор с регулируемыми фильтрационными свойствами, так как проницаемость глинистой корки примерно в 3 раза меньше проницаемости любой породы (кроме глинистого сланца). В результате почти весь перепад давления Δp приходится на глинистую корку. В этом случае Δp действует как поперечное давление, упрочняющее горную породу. Из сказанного следует, что сжимающие напряжения на стенке скважины могут быть уменьшены, а устойчивость ствола повышена путем увеличения плотности бурового раствора. В связи с этим необходимо заметить, что принципиальным моментом является определение плотности бурового раствора, обеспечивающего необходимое противодавление на критической глубине [20].

Анализ В.С. Новикова показал, что методы определения оптимальной плотности раствора в большинстве случаев не отражают объективных соотношения горного и порового давления в массиве и физико-механических свойств пород на стенке скважины и не позволяют прогнозировать устой-

чивость глинистых пород в процессе бурения. В работе [21] определена предельно допустимая плотность раствора для условий Норильского рудного узла ($1,03\text{--}1,11\text{ г/см}^3$). Производственные исследования при сооружении глубоких скважин на ТРУ показали, что увеличение плотности до $1,2\text{ г/см}^3$ не позволило обеспечить сохранность ствола скважины при перебурировании габбро-долеритов, трещины которых выполнены хлоритом. Необходимо отметить, что плотность повышали за счет добавления расчетного количества поваренной соли, а условная вязкость (по СПВ-5) составляла 20 сек. Практические исследования, выполненные В.Д. Гордновым [22], показали, что влияние гидростатического давления на устойчивость стенок скважины, сложенных на 80–90 % слабоувлажненными аргиллитами, не только не предотвратило осложнений, но, наоборот, интенсифицировало их, что в конечном итоге привело к обвалу пород с потерей циркуляции. С повышением гидростатического давления возрастает перепад давления в системе скважина–пласт и, следовательно, глубина проникновения фильтрата бурового раствора. Проникающий по микротрещинам фильтрат вызывает понижение твердости глинистых пород и, как следствие, обрушение стенок скважины. Визуальные наблюдения при извлечении кернового материала из керноприемной трубы показали, что в габбро-долеритах (рудная зона, рис. 3) преобладают трещины под углом $70\text{--}80^\circ$ к горизонту, выполненные хлоритом. Солевые растворы разрушают структуру связанной воды в хлоритах, понижают ее вязкость в граничном слое, что в конечном итоге приводит к разрушению стенок скважин и делает дальнейшее углубление практически невозможным. Поэтому требования к величине водоотдачи при бурении по глинистым и хлоритизированным породам должно быть значительно выше. Величина водоотдачи и перепада давления играют значительную роль, но не являются определяющими в сохранении устойчивости стенок скважины, сложенных глинистыми и хлоритизированными горными породами.

7. По заданию ООО «Норильскгеология» были проведены лабораторные исследования буровых растворов, содержащих силикат натрия, разработана технология приготовления растворов с добавками крахмала. Добавление жидкого стекла от 40 мл/л раствора благоприятно сказывается на сохранности хлоритовых образцов. На поверхности хлорита появляется нерастворимая силикатная пленка, которая препятствует гидратации образца. Визуальный осмотр показал, что фильтрат не проникает внутрь образца, что свидетельствует о взаимодействии силиката с катионами, в результате наблюдается естественная силикатизация хлоритов и монтмориллонита. Применение модифицированного крахмала позволяет контролировать фильтрационные потери совместно с жидким стеклом. Проявляется синергизм при

содержании жидкого стекла от 80 до 100 мл/л раствора. Силикат натрия, как показали наши исследования, характеризуется отличной коагулирующей способностью, а хлорид натрия работает как ионный насос, засасывая в глинистую породу воду, что впоследствии приводит к повышению подвижности пород и осыпанию стенок скважины. В табл. 2, 3 приведены расчетные значения потерь давления полимерных растворов с добавками жидкого стекла, рассчитанные по методике, изложенной в [23].



Рис. 3. Габбро-долериты, скважина RT-11. Интервал отбора керна: а) 1547–1552; б) 1552–1557 м

Fig. 3. Gabbro-dolerites, RT-11 well. Core sample interval is: а) 1547–1552; б) 1552–1557 m

Анализ представленных расчетных результатов показывает, что применение полимерных растворов с данными реологическими параметрами возможно при увеличении кольцевого зазора при бурении скважин комплексами КССК. Это можно осуществить за счет увеличения (разбухания) расчетного участка скважины до диаметра 93 мм или разработкой породоразрушающего инструмента с номинальным диаметром 80–82 мм.

8. При бурении по кровле рудной зоны необходимо заменить полимерсолевой раствор на полимерносиликатный. На первом этапе состав раствора: гаммаксан 0,2–0,3 мас. %, ПАЦ-LV

Таблица 2. Расчетные значения потерь давления полимерных растворов с добавками 50/1000 мл раствора жидкого стекла ($\rho=1,35 \text{ г/см}^3$) при расходе раствора 30 л/мин и частоте вращения бурильной колонны 500 об/мин

Table 2. Calculated values of pressure losses in polymer solutions with 50/1000 ml of liquid glass solution ($\rho=1,35 \text{ g/cm}^3$) at solution rate 30 l/min and rotation rate of drill stem 500 rpm

Химические реагенты, мас. % Chemical agents, wt. %		Реологические параметры степенной модели ($\tau=K\dot{\gamma}^n$) Rheological parameters of a power law model ($\tau=K\dot{\gamma}^n$)		Потери давления, Па/м Pressure losses, Pa/m						
Гаммаксан Gammaksan	ПАЦ-LV PATs-LV	n	K, мПа*с K, mPa*s	Кольцевой зазор, мм Annular space, mm						
				3	4	5	7	9	11,5	
0,3	0,5	0,5	0,54	14023	7014	4459	2016	1093	591	
0,4	0,5	0,45	0,97	17468	9469	5795	2691	1486	820	
0,5	0,5	0,43	1,39	21600	11820	7289	3420	1905	1062	
0,2	1,0	0,65	0,26	20036	9858	5623	2354	1208	621	

0,2–0,5 мас. %, жидкое стекло 50/1000 л раствора. Далее увеличиваем количество жидкого стекла на 10 л на каждые следующие 1000 л раствора. Максимальное количество жидкого стекла 100/1000 л раствора. Количество гаммаксана, ПАЦ-LV или крахмала необходимо корректировать по вязкости и потерям давления непосредственно на буровом агрегате. Это предварительные рекомендации, которые будут уточняться непосредственно при бурении глубоких скважин по согласованию с технологической службой ООО «Норильскгеология».

9. Параметр СНС раствора контролируется биополимером «ГАММАКСАН», поэтому концентрация должна быть не менее 0,3 мас. %. ПАЦ-LV не влияет на структуру раствора, а увеличивает пластическую вязкость – в этом и проявляется синергетический эффект. Критерием осаждения или нахождения шлама во взвеси может

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых платинометаллических руд / пер. с англ. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. – 438 с.
2. Формы нахождения благородных металлов в рудах комплексных месторождений: методология изучения, количественные характеристики, технологическое значение / Н.С. Бортников, В.В. Дистлер, И.В. Викентьев, Г.Н. Гамянин, А.В. Григорьева, Т.Л. Гроховская, С.Ф. Служеникин, Б.Р. Тагиров // Проблемы минералогии России: сб. научн. тр. – М.: Изд-во ГЦ РАН, 2012. – С. 365–385.
3. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.

Таблица 3. Расчетные значения потерь давления полимерных растворов с добавками 100/1000 мл раствора жидкого стекла ($\rho=1,35 \text{ г/см}^3$) при расходе раствора 30 л/мин и частоте вращения бурильной колонны 500 об/мин

Table 3. Calculated values of pressure losses in polymer solutions with 100/1000 ml of liquid glass solution ($\rho=1,35 \text{ g/cm}^3$) at solution rate 30 l/min and rotation rate of drill stem 500 rpm

Химические реагенты, мас. % Chemical agents, wt. %		Реологические параметры степенной модели ($\tau=K\dot{\gamma}^n$) Rheological parameters of a power law model ($\tau=K\dot{\gamma}^n$)		Потери давления, Па/м Pressure losses, Pa/m						
Гаммаксан Gammaksan	ПАЦ-LV PATs-LV	n	K, мПа*с K, mPa*s	Кольцевой зазор, мм Annular space, mm						
				3	4	5	7	9	11,5	
0,2	1,0	0,65	0,25	19265	9479	5403	2264	1161	597	
0,3	1,0	0,57	0,50	21609	11049	6479	2825	1490	787	
0,4	0,5	0,45	0,83	14946	8097	4957	2301	1269	701	
0,5	0,5	0,42	1,42	20505	11271	6977	3291	1839	1027	

служить перелив раствора при отрыве инструмента от забоя для извлечения керноприемной трубы или наращивания бурильной штанги. Если наблюдается «перелив», это свидетельствует об осаждении шлама и его накоплении в нижней части скважины. В конечном итоге осаждение шлама может привести к прихвату инструмента, а повышенные давления приводят к нарушению целостности изношенных бурильных труб и как следствие к аварийным ситуациям.

10. Для проведения каротажных работ в открытом стволе необходимо, чтобы ствол скважины был устойчивым. Для решения этой задачи необходимо применение псевдопластичных растворов с реологическими параметрами $n=0,3-0,5$, $K \approx 0,5-0,8 \text{ мПа*с}$, СНС $\approx 1-3 \text{ Па}$, что хорошо согласуется с [24] низкой фильтрацией 4–5 см³ за 30 минут.

4. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений / А.Д. Генкин, В.В. Дистлер, Г.Д. Гладышев, А.А. Филимонова, Т.П. Евстигнеева, В.А. Коваленкер, И.П. Лапутина, А.В. Смирнов, Т.Л. Гроховская. – М.: Наука, 1981. – 234 с.
5. Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М.: Госгеолтехиздат, 1959. – 67 с.
6. Петрология сульфидного магматического рудообразования / В.В. Дистлер, Т.П. Гроховская, Т.Л. Евстигнеева, С.Ф. Служеникин, А.А. Филимонова, О.А. Дюжиков, И.П. Лапутина. – М.: Наука, 1988. – 231 с.
7. Додин Д.А., Батуев Б.Н. Геология и петрология талнахских дифференцированных интрузий и их метаморфического ореола // Петрология и рудоносность талнахских и норильских дифференцированных интрузий. – Л.: Недра, 1971. – С. 31–101.

8. Геология и рудоносность Норильского района / О.А. Дюжиков, В.В. Дистлер, Б.М. Струнин, А.К. Мкртычян, М.Л. Шерман, С.Ф. Служеникин, А.М. Лурье. – М.: Наука, 1988. – 279 с.
9. Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии / В.В. Золотухин, В.В. Рябов, Ю.Р. Васильев, Ю.А. Шаткое. – Новосибирск: Наука, 1975. – 434 с.
10. Зотов И.А. Генезис трапповых интрузивов и метаморфических образований Талнаха. – М.: Недра, 1979. – 155 с.
11. Кравцов В.Ф., Седых Ю.Н., Гор Ю.Г. Геолого-структурные особенности Талнахского рудного поля // Петрология и рудоносность талнахских и норильских дифференцированных интрузий. – Л.: Недра, 1971. – С. 8–31.
12. Опарин В.Н. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 278 с.
13. Кульчицкий Л.И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1975. – 212 с.
14. Осипов В.И. Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 4. – С. 291–305.
15. Осипов В.И. Внутрикристаллическое разбухание глинистых минералов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 5. – С. 387–398.
16. Гизатуллин Б.И., Архипов Р.В., Сулейманова Е.А. Исследование гидратации бентонитовых глин методом ядерного магнитного резонанса // Георесурсы. – 2011. – № 6 (42). – С. 35–39.
17. Грим Р.Е. Минералогия и практическое использование глин. – М.: Мир, 1967. – 512 с.
18. Инженерно-геологические условия месторождений сульфидных медно-никелевых руд Талнахского рудного узла в полях рудников «Скалистый» и «Глубокий» / Г.А. Голодковская, Л.В. Шаумян, Э.С. Балашайтис, М.Б. Куринов, В.В. Ковалко, Н.А. Румянцева, И.А. Уткина, В.Н. Широков – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 561 с.
19. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 628 с.
20. Новиков В.С. Устойчивость глинистых пород при бурении скважин. – М.: Недра, 2000. – 270 с.
21. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в осложненных условиях. – М.: Недра, 1987. – 269 с.
22. Городнов В.Д. Физико-химические методы предупреждения осложнений в бурении. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 229 с.
23. Борисов Ф.И., Неверов А.Л., Рожков В.П. Расчет потерь давления при бурении с ССК с полимерной промывочной жидкостью // Известия вузов. Геология и разведка. – 1990. – № 7. – С. 125–130.
24. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Изд-во «Летопись», 2005. – 664 с.

Поступила 17.03.2014 г.

UDC 622.243

ANALYSIS OF MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF A LONG BOREHOLE DRILLING ON TALNAKH ORE CLUSTER

Vyacheslav V. Neskromnykh,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue,
Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sovair@bk.ru

Aleksandr L. Neverov,

Cand. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue,
Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Vladimir P. Rozhkov,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue,
Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Dmitri D. Karataev,

Norilskgeologiya, post office box 889, Norilsk, 663330,
Russia. E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Aleksandr A. Neverov,

M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, 31, Gazeta Krasnoyarsk
Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: aaneverov@gmail.com

Relevance of the work is caused by the necessity to drill the exploratory wells for searching rich copper-nickel ores at deep levels and flanks of Talnakh ore cluster.

The main aim of the study is to analyze geological and technical conditions of drilling deep wells on Talnakh ore cluster; to study rock samples for further development of well construction technology using the complexes with removable core tubes.

The methods used in the study: visual core description, analytical researches using the methods of X-ray fluorescence spectrometry, electron microscopy, X-ray, spectroscopic and tomographic analysis to determine the mineral composition of argillaceous rocks; labora-

tory testing of samples of chloritized rocks; calculations of pressure loss while drilling using complexes with removable core tube with polymer solution.

The results. Analysis and research of geological material of Talnakh ore cluster showed that the instability of the walls of wells occurs due to stress state of rock mass and a specific mineral composition of the material filling the cracks of ore zones and composing the walls of wells in sedimentary sequences. The analytical researches revealed that the samples are porous rocks mixture (0,1–5 microns) of crystalline and amorphous minerals. Destruction of mudstone and gabbro-dolerite collapse when interacting with water-based drilling fluids occur due to their mineral composition, in particular with the presence of chlorite and montmorillonite. Water penetrates into the micropores and microcracks which promotes disclosure cracks, hydration of clay minerals with sliding pads formation and as a consequence, leads to destruction. Calculation of the pressure loss showed the need to develop diamond crowns with an outer diameter of 80–82 mm for drilling with the complex with a wireline in difficult geological conditions of Talnakh ore cluster.

Key words:

Geological material, clay mineral, chlorite, gabbro-dolerite, borehole walls stability, stress state of rock mass, pressure loss.

REFERENCES

- Naldrett A.Dzh. *Magmaticeskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh platinometalnykh rud* [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel platinum metal ores]. St-Petersburg, SPbGU Press, 2003. 438 p.
- Bortnikov N.S., Distler V.V., Vikentev I.V., Gamyaniy G.N., Gri-goreva A.V., Grokhovskaya T.L., Sluzhenikin S.F., Tagirov B.R. *Formy nakhozheniya blagorodnykh metallov v rudakh kompleksnykh mestorozhdeniy: metodologiya izucheniya, kolichestvennyye kharakteristiki, tekhnologicheskoe znachenie* [Problems of minerageny of Russia]. Moscow, GC RAN Publ., 2012. pp. 365–385.
- Grey J.R., Darli G.S.G. *Sostav i svoystva burovnykh agentov (promyvochnykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling agents (drilling fluids)]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
- Genkin A.D., Distler V.V., Gladyshev G.D., Filimonova A.A., Evstigneeva T.P., Kovalenker V.A., Laputina I.P., Smirnov A.V., Grokhovskaya T.L. *Sulfidnye medno-nikelevye rudy norilskikh mestorozhdeniy* [Copper-nickel sulfide ore deposits of Norilsk]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 234 p.
- Godlevsky M.N. *Trappy i rudonosnye intruzii Noril'skogo rayona* [Trapps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1959. 67 p.
- Distler V.V., Grokhovskaya T.P., Evstigneeva T.L., Sluzhenikin S.F., Filimonova A.A., Dyuzhikov O.A., Laputina I.P. *Petrologiya sulfidnogo magmaticeskogo rudoobrazovaniya* [Petrology of magmatic sulfide ore formation]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 231 p.
- Dodin D.A., Batuev B.N. *Geologiya i petrologiya talnakhskikh differentsirovannykh intruziy i ikh metamorficheskogo oreola* [Petrology and ore-bearing of Talnakh and Norilsk differentiated intrusions]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. pp. 31–101.
- Dyuzhikov O.A., Distler V.V., Strunin B.M., Mkrtnyan A.K., Sherman M.L., Sluzhenikin S.F., Lure A.M. *Geologiya i rudonosnost Noril'skogo rayona* [Geology and ore-bearing of Norilsk region]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 279 p.
- Zolotukhin V.V., Ryabov V.V., Vasilev Yu.R., Shatkoe Yu.A. *Petrologiya Talnakhskoy rudonosnoy differentsirovannoy trappovoy intruzii* [Petrology of Talnakh ore-bearing differentiated trapp-an intrusion]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 434 p.
- Zotov I.A. *Genesis trappovykh intruzivov i metamorficheskikh obrazovaniy Talnakh* [Genesis of trappian intrusives and metamorphic formations of Talnakh]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 155 p.
- Kravtsov V.F., Sedykh Yu.N., Gor Yu.G. *Geologo-strukturnyye osobennosti Talnakhskogo rudnogo polya* [Petrology and ore-bearing of Talnakh and Norilsk differentiated intrusions]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. pp. 8–31.
- Oparin V.N. *Zonalnaya dezintegratsiya gornyykh porod i ustoychivost podzemnykh vyrabotok* [Zonal disintegration of rocks and stability of underground workings]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publishing House, 2008. 278 p.
- Kulchitskiy L.I. *Rol vody v formirovaniy svoystv glinistykh porod* [The role of water in formation of properties of argillaceous rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 212 p.
- Osipov V.I. *Nanoplenki adsorbirovannoy vody v glinakh, mekhanizm ikh obrazovaniya i svoystva* [Nanofilms of adsorbed water in clays, the mechanism of their formation and properties]. *Environmental Geoscience*, 2011, no. 4, pp. 291–305.
- Osipov V.I. *Vnutrikristallicheskie razbukhanie glinistykh mineralov* [Intracrystalline swelling of clay minerals]. *Environmental Geoscience*, 2011, no. 5, pp. 387–398.
- Gizatullin B.I., Arkhipov R.V., Suleymanova E.A. *Issledovanie gidratatsii bentonitovykh glin metodom yadernogo magnitnogo rezonansa* [Study of hydration of bentonite clays by NMR method]. *Georesources*, 2011, no. 6 (42), pp. 35–39.
- Grim R.E. *Mineralogiya i prakticheskoe ispolzovanie glin* [Mineralogy and practical use of clay]. Moscow, Mir Publ., 1967. 512 p.
- Golodkovskaya G.A., Shaumyan L.V., Balashaytis E.S., Kurinov M.B., Kovalko V.V., Rummyantseva N.A., Utkina I.A., Shirokov V.N. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya mestorozhdeniy sulfidnykh medno-nikelevykh rud Talnakhskogo rudnogo uzla v polyakh rudnikov Skalisty i Gluboky* [Engineering and geological conditions of sulfide copper and nickel ores of Talnakhskoe deposits in Skalisty and Glubokiy ore mine fields]. Moscow, MGU Publ., 1967. 561 p.
- Masket M. *Techenie odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede* [Flow of homogeneous fluids in porous media]. Izhevsk, Institute of Computer Sciences Publ., 2004. 628 p.
- Novikov V.S. *Ustoychivost glinistykh porod pri burenii skvazhin* [Stability of argillaceous rocks when drilling wells]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 270 p.
- Kudryashov B.B., Yakovlev A.M. *Burenie skvazhin v oslozhnennykh usloviyakh* [Well drilling under complicated conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 269 p.
- Gorodnov V.D. *Fiziko-khimicheskie metody preduprezhdeniya oslozhneniy v burenii* [Physicochemical methods of preventing complications in drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 229 p.
- Borisov F.I., Neverov A.L., Rozhkov V.P. *Raschet poter davleniya pri burenii s SSK s polimernoy promyvochnoy zhidkostyu* [Calculation of pressure loss while drilling with core barrel with inner tube with the polymer washing liquid]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1990, no. 7, pp. 125–130.
- Ryazanov Ya.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg, Letopis Publ., 2005. 664 p.

Received: 17 March 2014.

УДК 622.276: 519.688

АДАПТИВНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА КРИВОЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Романова Екатерина Валерьевна,

аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений
Института природных ресурсов Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: Romanova88EV@mail.ru

Сергеев Виктор Леонидович,

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

Предлагается и исследуется метод адаптивной идентификации и интерпретации результатов газодинамических исследований, актуальность которого обусловлена необходимостью сокращения времени простоя скважин. Основой предлагаемого метода является интегрированная система моделей кривой восстановления давления с переменными, зависящими от времени параметрами, позволяющая учитывать дополнительную априорную информацию и восстанавливать начальный участок забойного давления.

Цель исследования: разработка метода адаптивной идентификации и интерпретации, позволяющего определять параметры пластов и скважин в процессе проведения газодинамических исследований с восстановлением начального участка кривой восстановления забойного давления и учитывать дополнительную априорную информацию.

Методы исследования. Использованы теоретические и практические разработки в области газодинамических исследований скважин, системного анализа, идентификации систем с учетом дополнительной априорной информации, оптимизации функций и линейной алгебры. Решение задач проводилось на основе промысловых данных исследований скважин газоконденсатного месторождения по кривой восстановления давления, с учетом экспертных оценок фильтрационных параметров пласта. Приведены результаты сравнительного анализа предлагаемого метода интерпретации с идентификацией начального участка кривой восстановления давления и без его идентификации, а также результаты интерпретации, полученные с использованием компьютерной программы Saphir.

Результаты. Разработан метод адаптивной интерпретации газодинамических исследований скважин с идентификацией начального участка кривой восстановления давления, позволяющий синтезировать достаточно широкий спектр оптимальных алгоритмов определения параметров пластов и скважин в процессе проведения исследований, определять время их завершения и учитывать дополнительную априорную информацию. На примере обработки промысловых данных газодинамических исследований показано, что метод позволяет повысить точность и устойчивость определения параметров нефтяных пластов, значительно сократить время простоя скважин.

Ключевые слова:

Идентификация, интерпретация, адаптация, газодинамические исследования скважин, кривая восстановления давления, индикаторная кривая, априорная информация, газовые месторождения.

Введение

Нестационарные газодинамические исследования (ГДИ) скважин по кривой восстановления давления (КВД) являются в настоящее время наиболее информативным и востребованным методом определения параметров нефтяных и газовых пластов. Особенностью КВД, полученных в результате заранее спланированных ГДИ газовых скважин (рис. 1), является достаточно быстрый процесс восстановления забойного давления на начальном участке в пределах от одного до трех часов и далее достаточно медленный рост забойного давления до пластового. По завершению ГДИ большая часть КВД представляет линейную зависимость квадрата забойного давления от логарифма времени [1–4].

На способе выделения прямолинейного участка КВД с учетом при необходимости производной забойного давления основаны широко используемые в нефтегазовых компаниях методы обработки ре-

зультатов исследований. Аналогичные методы интерпретации КВД с выделением прямолинейного участка скважин реализованы в зарубежных программах PanSystem, Saphir. Следует отметить, что основным недостатком традиционных методов интерпретации КВД [1–10] является их затратный характер, поскольку обработка результатов производится после завершения заранее спланированных по времени проведения исследований, что связано с простоями скважин и значительной потерей добычи газа.

В данной работе на основе технологии адаптивной интерпретации гидродинамических исследований скважин с учетом дополнительной априорной информации [11–16] рассматриваются модели и алгоритмы адаптивной интерпретации ГДИ скважин по КВД, что позволяет определять фильтрационные параметры и энергетическое состояние пластов в процессе проведения исследований, не планируя заранее время их завершения.

Отметим, что метод учета притока при адаптивной интерпретации КВД в случае восстановления дебита нефтяных скважин на основе данных динамического уровня жидкости в стволе скважины рассмотрен в [6, 17, 18]. Особенность предлагаемого в работе метода заключается в адаптивной идентификации начального участка КВД в силу сложности его восстановления в связи с действием ряда трудно формализуемых факторов (притока газа в скважину после ее остановки, наличия конденсата, состояния призабойной зоны скважины и т. д.).

Метод адаптивной интерпретации с идентификацией начального участка кривой восстановления давления

В основе метода адаптивной интерпретации использована интегрированная система моделей КВД с учетом дополнительной априорной информации [11, 12, 16]

$$\begin{cases} \tilde{P}_{3,n}^2 = P_{3,n}^2 + \xi_n = f_3(t_n, q_n(a_n, t_n), b_n) + \xi_n, \\ \bar{v}_{j,n} = v_{j,n} + \eta_n = f_{a,j}(a_n, b_n, q_0) + \eta_{j,n}, \quad n = \overline{1, n_k}, \end{cases} \quad (1)$$

в которой параметры $a_n = (\alpha_j(t_n), j = \overline{1, m})$, $b_n = (b_k(t_n), k = \overline{1, p})$ – неизвестные однозначные функции $a_j(t_n)$, $b_k(t_n)$ дискретного времени t_n . Особенность (1) заключается в дополнительном введении в модель КВД функции заданной с точностью до вектора параметров a_n

$$q_n(a_n, t_n) \rightarrow 1 \text{ при } n \rightarrow \infty, \quad (2)$$

что позволяет идентифицировать ее начальный участок. В модели (1) приняты следующие обозначения: $\tilde{P}_{3,n}$, $P_{3,n}$ – фактические и вычисленные на основе модели КВД $f_3(t_n, q_n(a_n, t_n), b_n)$ значения забойного давления, полученные в моменты времени $t_n \in [t_0, t_k]$; t_0, t_k – время начала и завершения исследований; $\bar{v}_{j,n}$, $v_{j,n}$ – известные и вычисленные в момент времени t_n на основе модели $f_{a,j}(a_n, b_n, q_0)$ дополнительные априорные данные о параметрах нефтяного пласта и скважины; ξ_n , $\eta_{j,n}$ – случайные величины, представляющие погрешности измерений забойного давления скважины, ошибки дополнительных данных и экспертных оценок, неточность моделей и т. п.

Примером модели (1) являются интегрированная система моделей КВД неограниченного газового пласта с учетом априорной информации и экспертных оценок проводимости $\bar{\sigma}_n$, пьезопроводности $\bar{\chi}_n$ и квадрата пластового давления $\bar{P}_{пл,n}^2$

$$\begin{cases} \tilde{P}_{3,n}^2 = P_{3,n}^2(t_n, a_n, b_n) + \xi_n = \\ = \tilde{P}_{3,0}^2 + q_0 q(a_n, t_n)(b_{1,n} + b_{2,n} \lg(t_n)) + \xi_n, \\ \bar{\sigma}_n = \sigma_n + \eta_{1,n}, \bar{\chi}_n = \chi_n + \eta_{2,n}, \bar{P}_{пл,n}^2 = \\ = P_{3,n}^2(\bar{t}_p, a_n, b_n) + \eta_{3,n}, \quad n = \overline{1, n_k}, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$b_{1,n} = P_{3,0}^2 + b_{2,n} \lg\left(\frac{2,25 \chi_n}{r_{c,нр}^2}\right) + c_2 q_0^2, \quad b_{2,n} = \frac{2,3 q_0 T_{пл} z \rho}{2 \pi \sigma_n T_c};$$

$$\sigma_n = k_n h / \mu, \quad \chi_n = k_n P_{пл} / m \mu_{пл},$$

$\tilde{P}_{3,n}^2$ – фактические значения забойных давлений; $P_{3,0}$, q_0 – забойное давление и дебит газа в момент остановки скважины t_0 ; m – пористость; h – эффективная мощность пласта; $\rho_{c,нр}^2$ – приведенный радиус скважины; z_r – коэффициент сверхсжимаемости газа при пластовом давлении и пластовой температуре $T_{пл}$ ($T_c = 293K$); ρ – атмосферное давление; k_n – проницаемость пласта; $P_{пл,n}$ – пластовое давление; μ – вязкость газа в пластовых условиях; \bar{t}_p – экспертная оценка времени восстановления забойного давления до пластового; c_2 – параметр модели индикаторной кривой (ИК)

$$P_{3,i}^2 = P_{пл}^2 - c_1 q_i - c_2 q_i^2 + v_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4)$$

$P_{3,i}$, q_i – измеренные значения забойного давлений и дебита скважины [4]; $P_{пл}$ – пластовое давление; ξ_n , $\eta_{j,n}$, $j = \overline{1, 3}$, v_i – случайные величины.

Следует отметить, что введенная в модели КВД (1), (2) функция $q(a_n, t_n)$, примером которой является зависимость

$$q(a, t) = (1 - a_1 \exp(-a_2 t))^{\alpha_3}, \quad (5)$$

позволяет достаточно точно идентифицировать начальный участок КВД (рис. 1, сплошные линии 4–6).

Для модели КВД (3), согласно методу адаптивной интерпретации с учетом дополнительной априорной информации [12–16], оптимальные оценки проводимости пласта $\sigma_n^*(u_n)$, пьезопроводности $\chi_n^*(u_n)$ и пластового давления $P_{пл,n}^*(u_n)$ в моменты времени t_n рассчитываются по формулам:

$$\sigma_n^*(\omega_n^*) = \frac{42,4 q_0 \rho T_{пл} z_r}{b_{2,n}^*(\omega_n^*) T_c}, \quad (6)$$

$$\chi_n^*(\omega_n^*) = 0,445 r_c^2 \exp\left(\frac{b_{1,n}^*(\omega_n^*) - P_{3,0}^2 - c_2^* q_0^2}{b_{2,n}^*(\omega_n^*)}\right), \quad (7)$$

$$P_{пл,n}^*(\omega_n^*) = \sqrt{\left[\tilde{P}_{3,0}^2 + q_0 q(a_n^*(\omega_n^*, t_n), t_k)(b_{1,n}^*(\omega_n^*) + b_{2,n}^*(\omega_n^*) \lg(\bar{t}_p)) \right]}, \quad (8)$$

где $(u_n^*(\omega_n^*)) = (a_n^*(\omega_n^*), b_{1,n}^*(\omega_n^*), b_{2,n}^*(\omega_n^*))$ – вектор оптимальных оценок параметров модели КВД, управляющих параметров $\omega_n^* = (\omega_{1,n}^*, \omega_{2,n}^*, \omega_{3,n}^*)$ и оценок параметров индикаторной кривой $c^* = (c_1^*, c_2^*)$ (4) полученных путем решения оптимизационных задач:

$$u_n^*(\omega_n) = \arg \min_{\omega_n} \Phi(u_n, \omega_n), \quad (9)$$

$$\omega_n^* = \arg \min_{\omega_n} J_0(u_n^*(\omega_n)), \quad (10)$$

$$c^* = \arg \min_c (J_{ик}(c) = \sum_{i=1}^m \Psi_{ик}(v_i)). \quad (11)$$

Здесь запись $\arg \min_x f(x)$ означает точку минимума x^* функции $f(x)$ ($f(x^*) = \min_x f(x)$); $\Phi(u_n, \omega_n) = J_0(u_n) + J_a(u_n, \omega_n)$ – комбинированный показатель

качества, составленный из частного критерия качества модели КВД $P_3^2(t, a_n, b_n)$ (3)

$$J_0(u_n) = \sum_{i=1}^{n-1} w((t_n - t_{n-i} / h_n) \psi_0(\xi_i)) \quad (11)$$

и частного показателя качества

$$J_a(u_n, \omega_n) = \sum_{k=1}^3 \omega_{k,n} \psi_{a,k}(\eta_{k,n}) \quad (12)$$

моделей дополнительных априорных данных и экспертных оценок проводимости, пьезопроводности и пластового давления $\bar{\sigma}_h, \bar{\chi}_h, \bar{P}_{пл,k}$ известных к моменту времени t_n ; $w((t_n - t_{n-i})/h_n)$ – значения весовой (ядерной) функции $w((t - \tau)/h)$ с параметром h для обеспечения процесса адаптивной интерпретации; $J_{нк}(c)$ – показатель качества модели индикаторной кривой (4); $\psi_0, \psi_{a,j}, \psi_{нк}$ – известные функции.

Момент завершения газодинамических исследований t_k^* может быть определен по критерию стабилизации оценок параметров модели КВД $b_{1,n}^*(\omega_n^*), b_{2,n}^*(\omega_n^*)$ либо оценок параметров пласта (6)–(8) [12–15]. Например, за момент завершения исследований t_k^* принимается то значение времени t_n , при котором выполняется неравенство

$$\left| (\sigma_n^*(\omega_n^*) - \sigma_{n-i}^*(\omega_{n-i}^*)) / \sigma_n^*(\omega_n^*) \right| \leq \varepsilon, \quad i = 1, 2, 3$$

(ε – заданная точность). (13)

Результаты исследований моделей и алгоритмов адаптивной интерпретации кривой восстановления давления

Результаты исследований моделей и алгоритмов адаптивной интерпретации КВД скважин № 1, 2 газоконденсатного месторождения Тюменской области приведены на рис. 1, 3–5 и в табл. 2, 3.

На рис. 1 приведены фактические (линия 1) и восстановленные с учетом идентификации начального участка КВД (сплошные линии 4–6) значения забойного давления. На рис. 2 приведены используемые при интерпретации КВД фактические значения индикаторных кривых скважин № 1, 2.

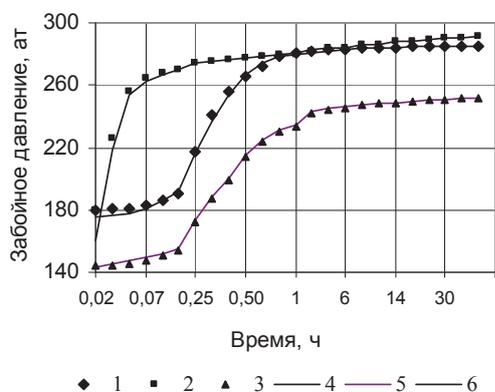


Рис. 1. Фактические (линии 1–3) и восстановленные значения забойного давления скважин № 1–3 (линии 4–6)

Fig. 1. Initial (lines 1–3) and recovery bottom-hole pressure values of the wells 1–3 (lines 4–6)

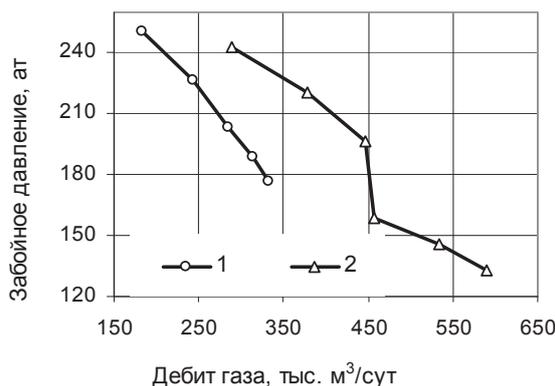


Рис. 2. Фактические значения индикаторных кривых скважин № 1, 2

Fig. 2. Initial data of indicator curves of the wells 1, 2

На рис. 3–5 приведены оценки параметров пласта с идентификацией начального участка КВД (линия 1) с использованием модели (5) и без идентификации при $q_n(a_n, t_n) \equiv 1$ (2) (линия 2).

Решение оптимизационных задач (9), (10) проводилось на основе метода деформированного многогранника [19] с использованием квадратичных показателей качества, согласно (11), (12)

$$\Phi(u_n, \omega_n) = \sum_{i=1}^{n-1} w((t_n - t_{n-i} / h_n) \xi_i^2) + \sum_{k=1}^3 \omega_{k,n} \eta_{k,n}^2, \quad (14)$$

$$J_0(u_n^*(\omega_n)) = \sum_{i=1}^{n-1} w((t_n - t_{n-i} / h_n) \xi_i^2(u_n^*(\omega_n))) \quad (15)$$

и стратегии «скользящего интервала» [12–13], что достигается соответствующим выбором параметра h единичной весовой функции

$$w((t - \tau) / h) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \in |(t - \tau) / h|; \\ 0 & \text{при } t \notin |(t - \tau) / h|. \end{cases} \quad (16)$$

Оценки неизвестных параметров $P_{пл}, c_1, c_2$ модели индикаторной кривой (4) определялись методом наименьших квадратов [20]

$$\beta^* = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^5 (P_{3,i}^2 - (P_{пл}^2 - c_1 q_i - c_2 q_i^2))^2, \quad (17)$$

где $\beta^* = (\beta_1^*, \beta_2^*, \beta_3^*) = (P_{пл}^*, c_1^*, c_2^*)$; $P_{3,i}, q_i$ – фактические значения забойного давления и дебита газа скважин № 1, 2, приведенные на рис. 2. Полученное приближение $P_{пл}^*$ (17) использовалась в качестве экспертной оценки пластового давления приведенной в табл. 1, а оценка c_2^* использована при расчете пьезопроводности пласта (7).

Исходные данные и экспертные оценки параметров пласта и скважины известные к моменту времени t_0 приведены на рис. 1 и в табл. 1.

В табл. 2, 3 приведены оценки проводимости, пьезопроводности и пластового давления за разные периоды газодинамических исследований с идентификацией начального участка КВД начального и без его идентификации полученные путем решения оптимизационных задач (9), (10) с ис-

пользованием показателей качества (14), (15) и весовой функции (16), а также оценки, рассчитанные с использованием программы Saphir. Время завершения исследований t_k^* определялось по алгоритму (13) при $\varepsilon=0,05$.

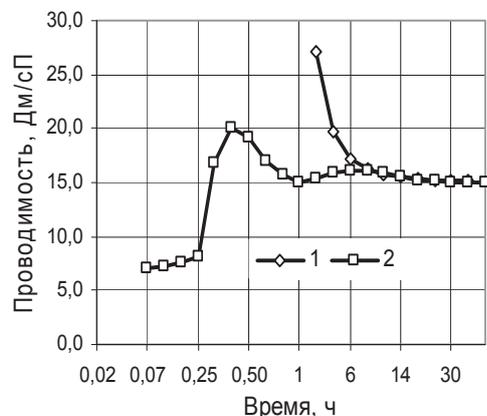


Рис. 3. Оценки проводимости пласта

Fig. 3. Reservoir conductivity estimates

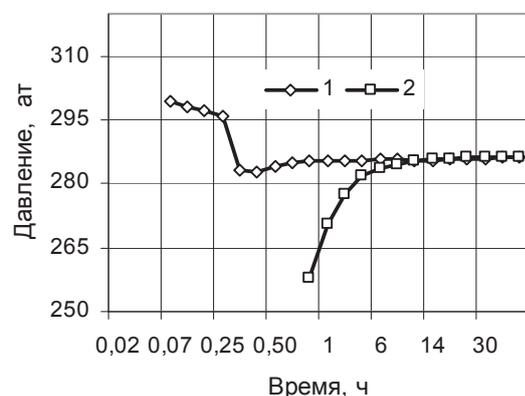


Рис. 4. Оценки пластового давления

Fig. 4. Reservoir pressure estimates

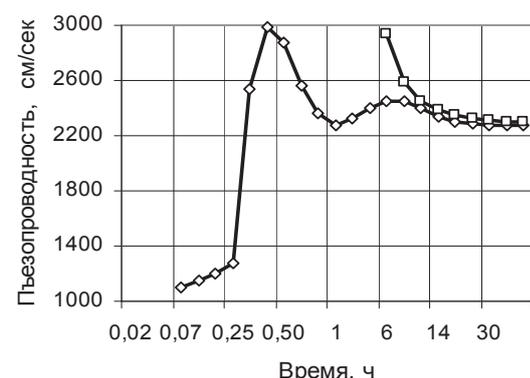


Рис. 5. Оценки пьезопроводности пласта

Fig. 5. Estimates of reservoir piezoconductivity

Из рис. 3–5 и табл. 2, 3 видно, что метод адаптивной интерпретации с идентификацией начального участка КВД обеспечивает получение более точных и устойчивых оценок фильтрационных параметров и пласта, сокращает время простоя скважин.

Таблица 1. Исходные данные и дополнительные априорные сведения

Table 1. Initial data and additional prior information

Исходные данные, дополнительные априорные сведения и экспертные оценки пласта и скважины Initial data, additional prior information and expert analysis of the reservoir and the well		Скважины Wells	
		1046	1112
Пластовая температура, °K Reservoir temperature, °K		356,66	353
Радиус, м Radius of (m)	контура питания скважины well external boundary	650	650
	скважины well	0,108	01,08
Атмосферное давление, ат Pressure, at		1,033	1,033
Температура при нормальных условиях (+20 °C) °K Temperature under normal conditions (+20 °C) °K		293	252,7
Коэффициент сжимаемости газа при пластовых условиях Gas deviation factor under reservoir conditions		0,9198	0,8778
Пористость Porosity		0,19	0,14
Эффективная мощность, м Effective power, m		11,8	138,2
Динамическая вязкость, спз Dynamic viscosity, cps		0,02	0,02
Дебит скважины до остановки, тыс. м³/сут Past producing life, thousand m³/day		332,25	252,12
Экспертная оценка Expert analysis of	проводимости пласта, Дм/спз reservoir conductivity, Dm/cps	30	5
	пьезопроводности пласта, см²/с reservoir piezoconductivity, cm²/s	3500	70
	пластового давления, ат reservoir pressure, at	300	300
Оценки Estimates of	времени восстановления забойного давления, ч recovery time of bottom-hole pressure, h	50	50
	параметра <i>a</i> модели ИК (4) parameter <i>a</i> of the model IC (4)	7,71	6,2
	параметра <i>b</i> модели ИК (4) parameter <i>b</i> of the model IC (4)	0,405	0,45
	пластового давления модели ИК (4) reservoir pressure of the model IC (4)	290	260

Выводы

1. Для увеличения информативности газодинамических исследований и сокращения времени простоя скважин предлагается метод адаптивной интерпретации с идентификацией начального участка кривой восстановления давления, что позволяет определять параметры пласта и скважины в процессе проведения исследований, определять время их завершения, учитывать дополнительную информацию.
2. Метод адаптивной интерпретации с идентификацией начального участка кривой восстановления давления позволяет синтезировать достаточно широкий спектр оптимальных алгоритмов в зависимости от вида моделей забойного давления, моделей дополнительных априор-

Таблица 2. Результаты интерпретации скважины № 1

Table 2. Results of interpretation of the well № 1

Методы Techniques	Время исследований, ч Acquisition time, h	Проводимость, Дм/спз Conductivity, Dm/cps	Пьезопроводность, см ² /с Piezoconductivity, cm ² /s	Пластовое давление, ат Reservoir pressure, at	Время завершения исследований t _к , ч Completion time t _к , h
Saphir	38	14,92	2280	282,2	38
Адаптивная интерпретация с идентификацией начального участка КВД Adaptive interpretation with identification of initial area of pressure recovery curve	0,5	17,0	2559	285,1	1
	1	15,4	2330	285,4	
	3	16,2	2440	285,6	
	6	16,1	2405	285,8	
	14	15,3	2390	285,6	
Адаптивная интерпретация без идентификацией начального участка КВД Adaptive interpretation without identification of initial area of pressure recovery curve	0,5	-7,3	-860,5	231,9	10
	1	123	17820,6	273,6	
	3	19,6	2936,6	282,7	
	6	17,2	2588,9	284,4	
	14	15,6	2352,6	285,7	

ных данных, показателей качества моделей, статистических характеристик случайных неконтролируемых факторов.

3. На примере исследований двух скважин газоконденсатного месторождения Тюменской области показано, что метод адаптивной интерпретации с идентификацией начального участка кривой восстановления давления, с учетом экспертных оценок проводимости, пьезопро-

Таблица 3. Результаты интерпретации скважины № 2

Table 3. Results of interpretation of the well № 2

Методы Techniques	Время исследований, ч Acquisition time, h	Проводимость, Дм/спз Conductivity, Dm/cps	Пьезопроводность, см ² /с Piezoconductivity, cm ² /s	Пластовое давление, ат Reservoir pressure, at	Время завершения исследований t _к , ч Completion time t _к , h
Saphir	35	3,81	49,1	253,1	35
Адаптивной интерпретации с идентификацией начального участка КВД Adaptive interpretation with identification of initial area of pressure recovery curve	0,5	3,94	51,7	254,6	1
	1	3,64	47,9	254,9	
	3	3,62	47,7	255,3	
	6	3,66	48,2	255,5	
	14	3,69	48,4	255,0	
Адаптивной интерпретации без идентификацией начального участка КВД Adaptive interpretation without identification of initial area of pressure recovery curve	0,5	-6,07	-51,9	166,2	10
	1	11,57	129,9	217,8	
	3	4,70	58,2	240,1	
	6	3,86	49,8	250,5	
	14	3,70	48,3	254,4	

водности и пластового давления позволяет значительно сократить время простоя скважин.

4. Предложенные модели и алгоритмы адаптивной интерпретации газодинамических исследований скважин могут быть использованы в системах оперативной обработки промысловых данных интеллектуальных скважин, оснащенных стационарными информационно измерительными системами.

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. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation // SPE. – 1984. – № 12777. – P. 293–302.
4. Руководство по исследованию скважин / А.И. Гриценко, З.С. Алиев, О.М. Ермилов, В.В. Ремизов, Г.А. Зотов. – М.: Наука, 1995. – 523 с.
5. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
6. Иктисанов В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 212 с.
7. Эрлагер Р. (мл.) Гидродинамические методы исследования скважин. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 512 с.
8. Кременецкий М.И., Ипатов А.И. Гидродинамические и промышленно-технологические исследования скважин. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 476 с.
9. Васильев Ю.Н., Дубина Н.И. Математические основы обработки результатов газодинамических исследований скважин. – М.: ООО «НЕДРА-Бизнесцентр», 2008. – 116 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. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.
12. Сергеев В.Л., Аниканов А.С. Метод адаптивной идентификации гидродинамических исследований скважин с учетом априорной информации // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 50–52.
13. Гаврилов К.С., Сергеев В.Л. Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина» методом интегрированных моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 72–75.
14. Романова Е.В., Сергеев В.Л. Адаптивная интерпретация кривой восстановления давления горизонтальных скважин с диагностикой потоков // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 20–25.
15. Сергеев В.Л., Гаврилов К.С. Адаптивная идентификация и интерпретации нестационарных газодинамических исследований скважин газовых и газоконденсатных месторождений // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 2 (32). – Июнь. – С. 270–275.
16. Сергеев В.Л., Наймушин А.Г., Нгуен Куинь Хуи. Адаптивная идентификация эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе интегрированных систем феноменологических моде-

- лей // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 323. – № 1. – С. 177–183.
17. Оценка влияния послепритока на результаты интерпретации данных гидродинамических исследований скважин / А.А. Ерофеев, В.А. Мордвинов, И.Н. Пономарев, В.В. Поплыгин // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 49–51.
18. Анканов А.С., Кемерова П.А., Сергеев В.Л. Адаптивная идентификация и интерпретация результатов нестационарных гидродинамических исследований с учетом притока продукции в скважине // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 43–46.
19. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.
20. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 300 с.

Поступила 10.04.2014 г.

UDC 622.276: 519.688

ADAPTIVE INTERPRETATION OF GAS-DYNAMIC RESEARCH OF WELLS IDENTIFYING THE INITIAL AREA OF A PRESSURE RECOVERY CURVE

Ekaterina V. Romanova,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Romanova88EV@mail.ru

Viktor L. Sergeev,

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

The paper introduces and studies the method of adaptive identification and interpretation of the results of gas-dynamics research. Its relevance is caused by the need to reduce well downtime. The base of the method proposed is the integrated system of pressure recovery curve with the variables, time-dependent parameters. The system allows taking into account additional a priori information and restoring the initial part of bottom-hole pressure.

The aim of the research is to develop the method of adaptive identification and interpretation which allows determining the parameters of reservoirs and wells at gas-dynamics researches restoring the initial part of the bottom-hole pressure recovery curve and taking into account the additional a priori information.

Methods of the research. The authors have applied the theoretical and practical developments in the field of gas-dynamics researches of wells, system analysis, system identification considering additional a priori information, function optimization and linear algebra. The problems were solved on the basis of field data of well exploration in gas condensate deposit by the pressure recovery curve considering expert estimates of the reservoir filtration parameters. The paper introduces the results of comparative analysis of the proposed interpretation method with identification of the initial part of the pressure recovery curve and without its identification as well as the interpretation results obtained while using the computer program Saphir.

Results. The authors developed the method of adaptive interpretation of gas-dynamics research of wells with identification of the initial part of the pressure recovery curve which allows synthesizing a wide range of optimal algorithms for determining the parameters of reservoirs and wells at exploration, determining the time of their completion and considering additional a priori information. By the example of processing the field data of gas-dynamics researches it was shown that the method can improve the accuracy and stability of determining parameters of oil reservoirs, greatly reduce downtime.

Key words:

Identification, interpretation, adaptation, gas dynamic well testing, pressure recovery curve, indicator curve, a priori information, gas 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.
- Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation. *SPE*, 1984, no. 12777, pp. 293–302.
- Gritsenko A.I., Aliev Z.S., Ermilov O.M., Remizov V.V., Zotov G.A. *Rukovodstvo po issledovaniyu skvazhin* [Well exploration guide]. Moscow, Nauka Publ., 1995. 523 p.
- Shagiev R.G. *Issledovanie skvazhin po KVD* [Investigation of wells by pressure recovery curve]. Moscow, Nauka Publ., 1998. 304 p.
- Iktisanov V.A. *Opreделение filtratsionnykh parametrov plastov i reologicheskikh svoystv dispersnykh sistem pri razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy* [Determination of filtration reservoir characteristics and rheological properties of disperse systems in the development of oil fields]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2001. 212 p.
- Erlager R. (jr.). *Gidrodinamicheskie metody issledovaniya skvazhin* [Hydrodynamic studies of wells]. Moscow, Izhevsk, Institut kompyuternykh issledovaniy, 2006. 512 p.
- Kremenetskiy M.I. *Gidrodinamicheskie i promyslovo-tehnologicheskie issledovaniya skvazhin* [Hydrodynamic and industrial-technological research of wells]. Moscow, MAKS Press, 2008. 476 p.
- Vasilev Yu.N., Dubina N.I. *Matematicheskie osnovy obrabotki rezultatov gazodinamicheskikh issledovaniy skvazhin* [Mathematical foundations of processing the results of gas dynamical studies of wells]. Moscow, NEDRA- Biznestsentr Publ., 2008. 116 p.

10. 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.
11. Sergeev V.L. *Integrirovannye sistemy identifikatsii* [Identification Integrated System]. Tomsk, TPU Publ. House, 2011. 198 p.
12. Sergeev V.L., Anikanov A.S. Metod adaptivnoy identifikatsii gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin s uchedom apriornoy informatsii [Method of adaptive identification of well testing, taking into account a priori information]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 5, pp. 50–52.
13. Gavrilov K.S., Sergeev V.L. Adaptivnaya interpretatsiya nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin v sisteme «plast-skvazhyna» metodom integrirovannykh modeley [Adaptive interpretation of transient well test in the «layer-well» system by the method of integrated models]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 72–75.
14. Romanova E.V., Sergeev V.L. Adaptivnaya interpretatsiya kрivoy vosstanovleniya davleniya gorizontalnykh skvazhin s diagnostikoy potokov [Adaptive interpretation of pressure recovery curve of horizontal wells with flow diagnostics]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 20–25.
15. Gavrilov K.S., Sergeev V.L. Adaptivnaya identifikatsiya i interpretatsii nestatsionarnykh gazodinamicheskikh issledovaniy skvazhin gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy [Adaptive identification and interpretation of unsteady gasdynamic studies of wells and gas condensate fields]. *Doklady TUSUR*, 2014, no. 2 (32), June, pp. 270–275.
16. Sergeev V.L., Naymushin A.G., Nguen Kuin Xui. Adaptivnaya identifikatsiya evolyutsionnykh protsessov neftegazodobychi na osnove integrirovannykh sistem fenomenologicheskikh modeley [Adaptive identification of evolutionary processes of oil and gas production based on integrated systems of phenomenological models]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 323, no. 1, pp. 177–183.
17. Erofeev A.A., Mordvinov V.A., Ponomarev I.N., Poplygin V.V. Otsenka vliyaniya poslepritoka na rezultaty interpretatsii dannykh gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin [Assessing the impact of post-influx on the results of interpretation of well test data]. *Neftyanoe hozyaystvo*, 2013, no. 4, pp. 49–51.
18. Anikanov A.S., Kemerova P.A., Sergeev V.L. Adaptivnaya identifikatsiya i interpretatsiya rezultatov nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh issledovaniy s uchedom pritoka produktsii v skvazhine [Adaptive identification and interpretation of the results of unsteady hydrodynamic studies considering product influx in a well]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 5, pp. 43–46.
19. Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow, Vyshaya shkola publ., 2002. 544 p.
20. Demidenko E.Z. *Lineynaya i nelineynaya regressii* [Linear and nonlinear regressions]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1981. 300 p.

Received: 10 April 2014.

УДК 550.832:553.983

ПРОГНОЗ КОЛЛЕКТОРОВ В РАЗРЕЗЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ПО МАТЕРИАЛАМ КЕРНА И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Куляпин Павел Сергеевич,

петрофизик компании «СЖЖ Восток», Россия, 115162, г. Москва,
ул. Шаболовка, д. 31, стр. Б. E-mail: pavel.kulyapin@gmail.com

Соколова Татьяна Федоровна,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизических
информационных систем Российского Государственного университета
нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва,
Ленинский пр., д. 65, корп. 1. E-mail: tfsokolova2013@yandex.ru

Освоение трудноизвлекаемых запасов нефти и газа является одной из наиболее актуальных и сложных задач последнего времени. Несмотря на то, что ещё в XIX в. нефтегазоматеринские породы были известны геологам как источник углеводородного сырья, только в конце двадцатого столетия их стали рассматривать как реальную альтернативу традиционным ресурсам нефти и газа. Приводится краткий литературный обзор, посвященный вопросу о коллекторском потенциале нефтегазоматеринских пород, а также существующим способам оценки содержания органического вещества ($C_{орг}$) по материалам геофизических исследований скважин.

Цель исследования: разработка новых способов прогноза коллекторов в разрезе баженовской свиты по материалам керна и геофизических исследований скважин.

Рассматриваются несколько видов типизации пород баженовской свиты по методам геофизических исследований скважин в различных параметризациях: отношение $U/Th-C_{орг}$, показание гамма-каротажа $-C_{орг}$, показание гамма-каротажа – показание плотностного каротажа ГГК-П.

Объемная модель горной породы является основой для понимания особенностей литологического строения и коллекторских свойств разреза. Предлагается способ прямого включения результатов анализа керна при построении объемной модели пород баженовской свиты по материалам керна и геофизических исследований скважин.

Обоснованы новые способы эмпирического расчета плотности и интервального времени пробега упругих волн в разрезе баженовской свиты, что позволяет выполнять расчет механических свойств и прогнозировать наиболее хрупкие интервалы разреза. Приводится пример расчета упругих свойств и выделения хрупких пород в скважинах Салымского района с ограниченным комплексом геофизических исследований скважин.

Ключевые слова:

Трудноизвлекаемые запасы углеводородов, баженовская свита, нефтематеринские породы, органическое вещество, коллекторы, трещиноватость, спектральный гамма-каротаж, типизация пород, упругие свойства, хрупкость.

Коллекторский потенциал нефтематеринских пород

Уолтер Фертл [1] в статье, посвященной возможностям спектрального гамма-каротажа при изучении нефтегазоматеринских пород, отмечал, что такие породы чаще характеризуются низкими коэффициентами пористости и проницаемости, но в некоторых случаях они обладают удовлетворительными коллекторскими свойствами – пористостью матрицы (K_p до 12 %) и проницаемостью. Наличие системы естественных трещин в дополнение к матричной пористости является ключевым фактором, обеспечивающим высокие начальные дебиты и рентабельную добычу углеводородов (УВ). Фертл также приводит примеры скважин с высокими дебитами, полученными из нефтегазоматеринских пород без применения мер по интенсификации притока, которые иллюстрируют вклад трещиноватости в общую емкость пород.

Т.Т. Клубова [2] выполнила всестороннее изучение нефтегазоматеринских пород, представленных на территории бывшего СССР. На территории России основные надежды в освоении запасов нефтегазоматеринских пород связаны с тремя перспективными объектами:

- баженовской свитой и ее аналогами в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП);
- карбонатными отложениями доманиковского горизонта Волго-Уральской и Тимано-Печорской НГП;
- хадумской и баталпашинской свитами Предкавказья.

Основой коллекторского потенциала таких пород Т.Т. Клубова назвала «текстурную неоднородность», которая формируется в результате контакта разных по текстуре участков. Формирование же трещиноватости, по её мнению, происходит под влиянием тектонических напряжений в неоднородных хрупких и ослабленных зонах. Протяженность и раскрытость зон контактов определяют фильтрационные возможности пород. Т.Т. Клубова утверждает, что свойства ослабленных зон лабораторными методами не фиксируются. Действительно, исследования керна, которые выполняются в петрофизической лаборатории на стандартных образцах, отобранных из нефтематеринских пород, позволяют определять исключительно лишь параметры матрицы (пористость, проницаемость). Трещинную и кавернозную составляющие

вторичной емкости коллекторов можно учесть только при изучении полноразмерных образцов керн, имидж-анализом колонки керн, либо косвенно – методами геофизических исследований скважин (ГИС) или показателями работы скважин. В работе Т.Т. Клубовой отмечается, что «измеренные по керну величины пористости и проницаемости этих пород значительно ниже действительных, обеспечивающих дебиты до 60 м³/сут (доманиковый горизонт). Причина заключается в том, что коллекторские свойства глинистых коллекторов зависят от текстурной неоднородности, обусловленной образованием ослабленных зон, которые разъединяются под давлением мигрирующей нефти при формировании залежей, отдают нефть при разработке и закрываются при снижении давления и выносе керн» [2].

При изучении пород хадумской и баталпашинской свит Предкавказья С.А. Дудаев [3] также связывал естественную трещиноватость с границами раздела литологических разностей, зонами резкого прогиба или изменения направления протекания однородных прослоев, скоплением тонкослоистых хрупких пород, обогащенных известковистым, алевритистым материалом. Характерную черту структуры рыхлых черных глин хадумской и баталпашинской свит – их легкую разрушаемость – установил А.И. Копыльцов и др.: «...при размокании в воде они распадаются на мелкие (не более 1 см в поперечнике) тонкие (доли мм) остроугольные обломки. Вид обломков говорит не о набухании глин, а о разрушении породы по тончайшим ослабленным зонам, в роли которых выступают литогенетические (межслоевые) трещины» [4]. Также в этой работе приводится классификация типов емкости нефтегазоматеринских пород, которая включает межагрегатные поры, трубчатые каналы, ориентированные вдоль напластования литогенетические трещины, субвертикальные тектонические трещины скола.

А.М. Жарков [5] подчеркивает, что влияние трещиноватости на проницаемость пород баженовской свиты является определяющим. «Выделяются две основные взаимосвязанные системы трещин: субвертикальная, связанная с дизъюнктивной тектоникой, и преимущественно горизонтальная микротрещиноватость, формируемая под действием аномально высокого порового давления в местах генерации УВ» [5]. Существует версия, высказываемая Г.М. Таруцем, Е.А. Гайдебуровой [6], А.Я. Фурсовым, Е.В. Постниковым, А.В. Постниковым [7] и др., согласно которой именно тектоническая трещиноватость обеспечила формирование высокопроницаемых коллекторов в кремнисто-глинистых и плотных карбонатно-кремнистых породах. Например, на территории Большого Салыма широкое развитие зон повышенной трещиноватости подтверждается распределениями температурных аномалий. Здесь зоны повышенных температур ориентированы в линейном меридиональном направлении по флексурно-разломным зонам

древнего заложения, что свидетельствует об их связи с глубинными слоями по выявленным разломам.

Д. Рокош и др. отмечают, что сланцевые коллекторы нефти и газа, обладающие повышенной трещиноватостью, обеспечивают хорошие дренажные свойства объекта и высокую отдачу УВ при разработке. Однако для поддержания темпов добычи углеводородов из низкопроницаемой матрицы должно осуществляться поступление нефти и газа по естественным или искусственно созданным (при гидроразрыве) трещинам. В общем случае наличие более проницаемой матрицы породы приводит к более высокой скорости поступления УВ и большим дебитам скважин. А.И. Копыльцов и др. отмечают следующую тенденцию при разработке залежей хадумской и баталпашинской свит: «...отличительной особенностью скважин, находящихся в пробной эксплуатации, является постепенное снижение в них начальных дебитов нефти». Скорее всего это вызвано смыканием трещин при постепенном падении пластового давления и увеличением роли притока УВ из матрицы при длительной разработке.

Таким образом, коллекторский потенциал нефтегазоматеринских пород связан преимущественно с наличием в разрезе хрупких ослабленных зон и пород, обладающих естественной трещиноватостью.

Оценка содержания органического углерода по материалам геофизических исследований скважин

Одним из важных показателей, характеризующих степень зрелости органического вещества (ОВ) и способность к генерации УВ, является содержание органического углерода ($C_{орг}$).

Западными исследователями было разработано несколько методик оценки $C_{орг}$ с помощью методов ГИС. Широко используемой является методика К. Пасси [10] (формулы 1–3), в которой применяется нормализация показаний методов пористости (акустического, нейтронного или плотностного) и сопротивления пород. Перемасштабирование кривых выполняется таким образом, что их совпадение наблюдается в интервалах пород с различной пористостью, но с низким содержанием органического вещества, в то время как превышение кривой сопротивления над нормализованной кривой пористости отмечается в интервале нефтегазоматеринских пород. Это приращение характеризует параметр $\Delta \text{Log}R$, который рассчитывается следующим образом:

$$\Delta \text{Log}R_{DT} = \lg(\rho_n / \rho_{rn}) + 0,02(\Delta T - \Delta T_{rn}), \quad (1)$$

либо $\Delta \text{Log}R_N = \lg(\rho_n / \rho_{rn}) + 4(Wn - Wn_{rn})$, (2) где ΔT взято в мкс/фт; ρ_n , ΔT_{rn} , Wn_{rn} – показания соответствующих методов ГИС в опорном интервале с низким содержанием ОВ.

Содержание органического углерода пропорционально относительному приращению $\Delta \text{Log}R$ и определяется выражением (3):

$$C_{\text{орг}} = \Delta \text{Log} R * 10^{(2,297 - 0,1688 * \text{ЛОМ})}, \quad (3)$$

учитывающим степень метаморфизма органического вещества (показатель ЛОМ) нефтегазоматеринской породы. Значение ЛОМ может быть определено, если известны отражательная способность витринита, характерная для изучаемого ОБ, либо температурный режим залежи углеводородов. Пределы изменения показателя ЛОМ, в зависимости от степени зрелости породы, находятся в следующем диапазоне значений:

- ЛОМ=6 для незрелого ОБ (породы молодые или неглубоко залегающие, отсутствие генерации УВ);
- ЛОМ=8–10 для зрелого ОБ (происходит генерация нефти или газа);
- ЛОМ=12 для перезрелого ОБ (все УВ «выгорели»).

Эффект приращения сопротивления ρ_n при нормализации будет наблюдаться и в традиционных коллекторах с подвижными углеводородами. В этом случае для оценки $C_{\text{орг}}$ в нефтегазоматеринских породах и исключения из рассмотрения интервалов продуктивных традиционных коллекторов Пасси (рис. 1) предлагал использовать показания гамма-каротажа (ГК), который позволяет выделить нефтегазоматеринские породы по высокой естественной радиоактивности, обусловленной повышенным содержанием в них урана.

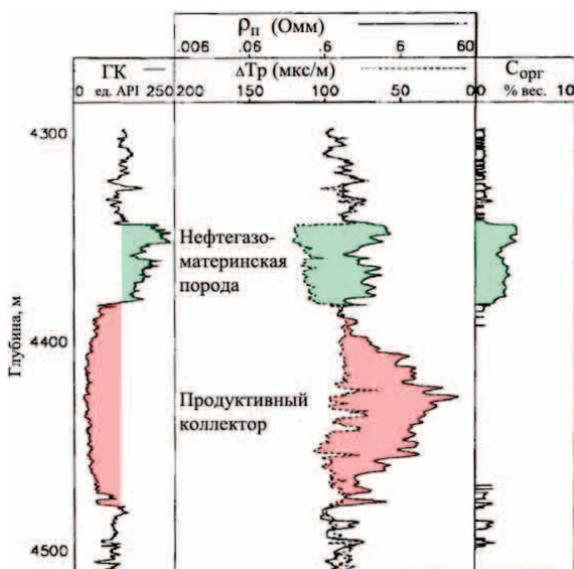


Рис. 1. Разделение эффектов приращений на методах сопротивления и пористости, связанных с нефтегазоматеринскими породами и продуктивными коллекторами. Нормализация показаний акустического метода и метода сопротивления – по К. Пасси (1990)

Fig. 1. $\Delta \text{Log} R$ overlay showing baselined resistivity and porosity logs, after Q. Passey (1990). Colored separations are related to source rocks and hydrocarbon-bearing reservoirs

Ранее схожий способ нормализации пористости и сопротивления для выделения продуктивных коллекторов, который активно используется для выделения продуктивных интервалов в терригенных и карбонатных разрезах, был предложен Н.З. Заляевым.

Другим способом, позволяющим выполнять оценку $C_{\text{орг}}$ по материалам ГИС является методика Д.Р. Айсслера и др. [11], которые построили палетки, позволяющие рассчитать $C_{\text{орг}}$ путем непосредственного сопоставления плотности δ_n , либо интервального времени ΔT_n , и сопротивления пород ρ_n . Тристан Эузен [13] выполнил оцифровку палеток (формулы 4, 5), разработанных Айсслером и др., получив при этом следующие уравнения:

$$C_{\text{оргГКК-П}} = a \left(\frac{-0,1429(1000\delta_n - 1014)}{\lg \rho_n + 4,122} + 45,14 \right) / 100 + b, \quad (4)$$

$$C_{\text{оргАК}} = c(0,0714(\Delta T_n + 195 \lg \rho_n) - 31,86) / 100 + d, \quad (5)$$

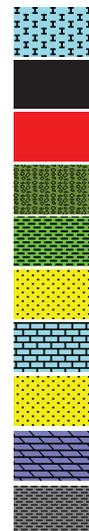
где плотность δ_n берется в г/см³, а интервальное время ΔT_n – в мкс/м. Коэффициенты a и c в уравнениях Эузена равны 1, b и d – нулю; они применяются для настройки в изучаемом разрезе. Мы выполнили определение значений коэффициентов a , b , c и d , для разреза баженовской свиты:

- $a=0,92$;
- $b=-0,06$;
- $c=0,46$;
- $d=-0,01$.

Анализ результатов оценок $C_{\text{орг}}$ несколькими способами приводится на рис. 2 и указывает на их достаточно хорошее соответствие. Необходимо упомянуть важность этапа адаптации применяемых уравнений для оценки $C_{\text{орг}}$ по материалам ГИС с помощью результатов пироллиза. В условиях отсутствия таких исследований для рассматриваемых нами скважин настройка выполнялась по известному диапазону изменения значений $C_{\text{орг}}$ в разрезе баженовской свиты, приведенному в литературных источниках [14] и варьирующемуся в пределах 10–20 вес. %.

Построение литологической колонки на рис. 2 и во всех скважинах, приводимых в дальнейшем в статье, выполнялось в соответствии с классификацией, разработанной авторами [16] и включающей 10 литотипов:

- 1) известняки с примесью силикатного материала и органики
- 2) силициты сильно битуминозные
- 3) силициты битуминозные, известковистые, пиритизированные
- 4) силициты глинисто-битуминозные
- 5) силициты глинистые, частично битуминозные
- 6) переслаивание силицитов и карбонатных пород
- 7) чистые известняки
- 8) то же, что литотип 6, но с более высокой карбонатностью
- 9) силициты плотные, карбонатизированные, слабглинистые
- 10) глины слабобитуминозные



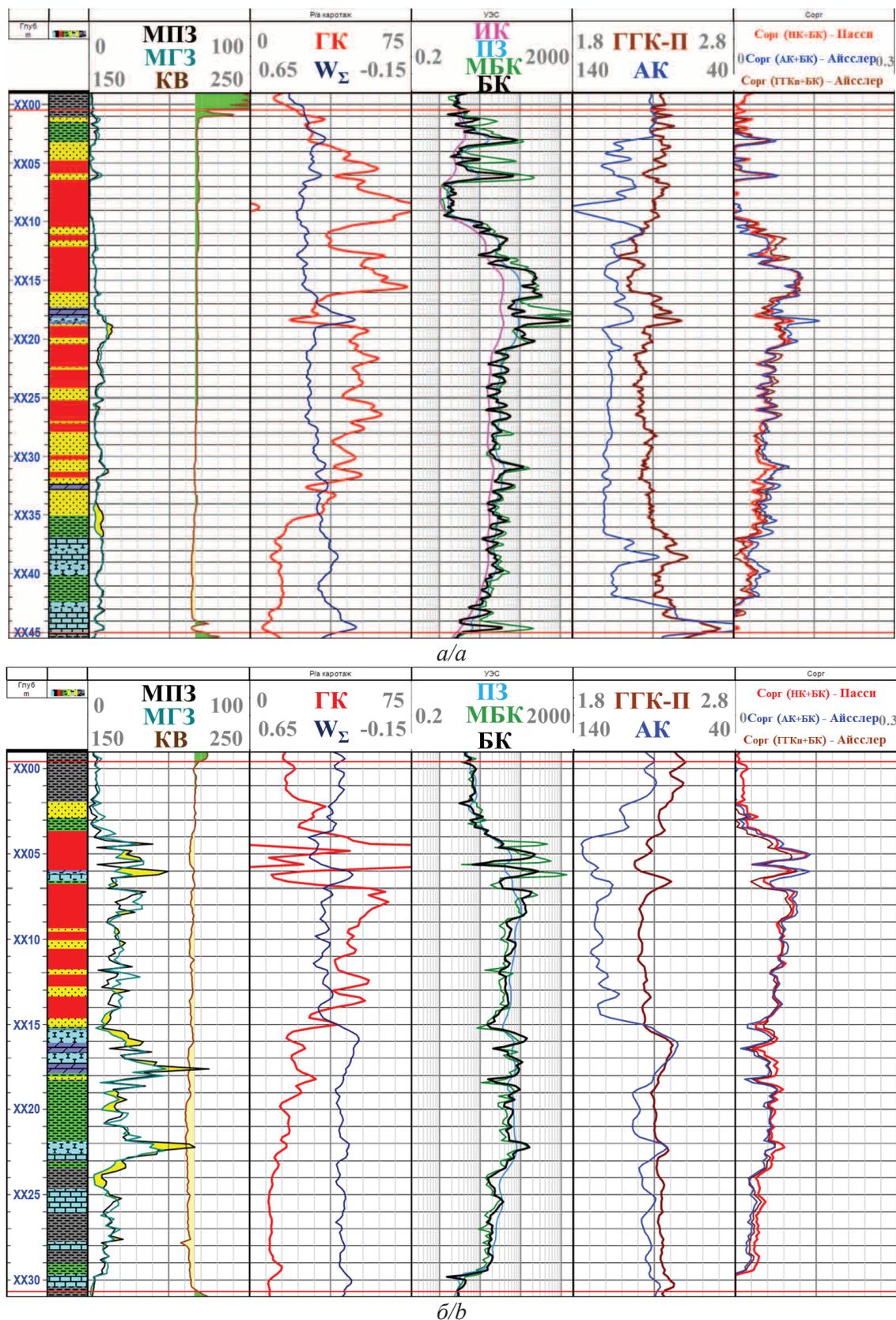


Рис. 2. Сопоставление содержания органического углерода (правая колонка планшета, $C_{орг}$ в д.ед.), определенного по методу Пасси и Айсслера в разрезе одной из скважин: а) Красноленинского; б) Сургутского свода

Fig. 2. Comparison of total organic carbon content (right track of the logplot, TOC in fractions) determined from Quinn Passey's ΔLogR technique vs. Dale Issler's method in the well of: a) Krasnoleninsky Arch; b) Surgut Arch

Описанные методики позволяют выполнить оценку содержания органического углерода по материалам ГИС, которое является непосредственным показателем степени зрелости нефтегазоматеринской породы.

Типизация пород баженовской свиты с привлечением спектральной и интегральной модификации гамма-каротажа

С.А. Дудаев, изучая нефтематеринские отложения олигоцена Восточного Предкавказья, выполнил классификацию пород в поле параметров «отношение $U/Th-C_{орг}$ » на основании результатов исследований керна. Коллекторы в поле этих параметров характеризуются низкими значениями $C_{орг}$ и повышенными значениями величины U/Th , и, согласно С.А. Дудаеву, соответствуют «интервалам повышенной трещиноватости, обогащенным микрофауной и рыбным детритом» [15].

Используя описанные выше методики оценки $C_{орг}$ по материалам ГИС, можно выполнить аналогичную типизацию пород баженовской свиты с привлечением спектральной модификации гамма-каротажа (рис. 3). В разрезе баженовской свиты

скважин Сургутского свода коллекторы характеризуются диапазоном значений $C_{орг}$ в пределах 2–6 вес. % и отношения U/Th в пределах 2,5–12 вес. %. Выделенные на основании этих критериев коллекторы в разрезе скважин (рис. 4) соответствуют границам между карбонатизированными и кремнистыми породами, что согласуется с точкой зрения Т.Т. Клубовой о контактах наиболее хрупких участков разреза на участках текстурно-неоднородных разностей пород.

Следует также отметить область высоких значений отношения $U/Th > 22$, которая характерна, скорее всего, для интервалов возможного развития трещиноватости либо для пород с аномально высоким содержанием органического вещества.

В поле параметров «отношение $U/Th-C_{орг}$ » глинистые разности выделяются невысокими значениями U/Th и $C_{орг}$, а непосредственно нефтематеринские породы значениями $C_{орг} > 6$ вес. % и U/Th в пределах 0–20.

Наличие тенденции к пропорциональному увеличению интегральной радиоактивности пород с ростом значений отношения U/Th для пород баженовской свиты (рис. 5) позволяет использовать

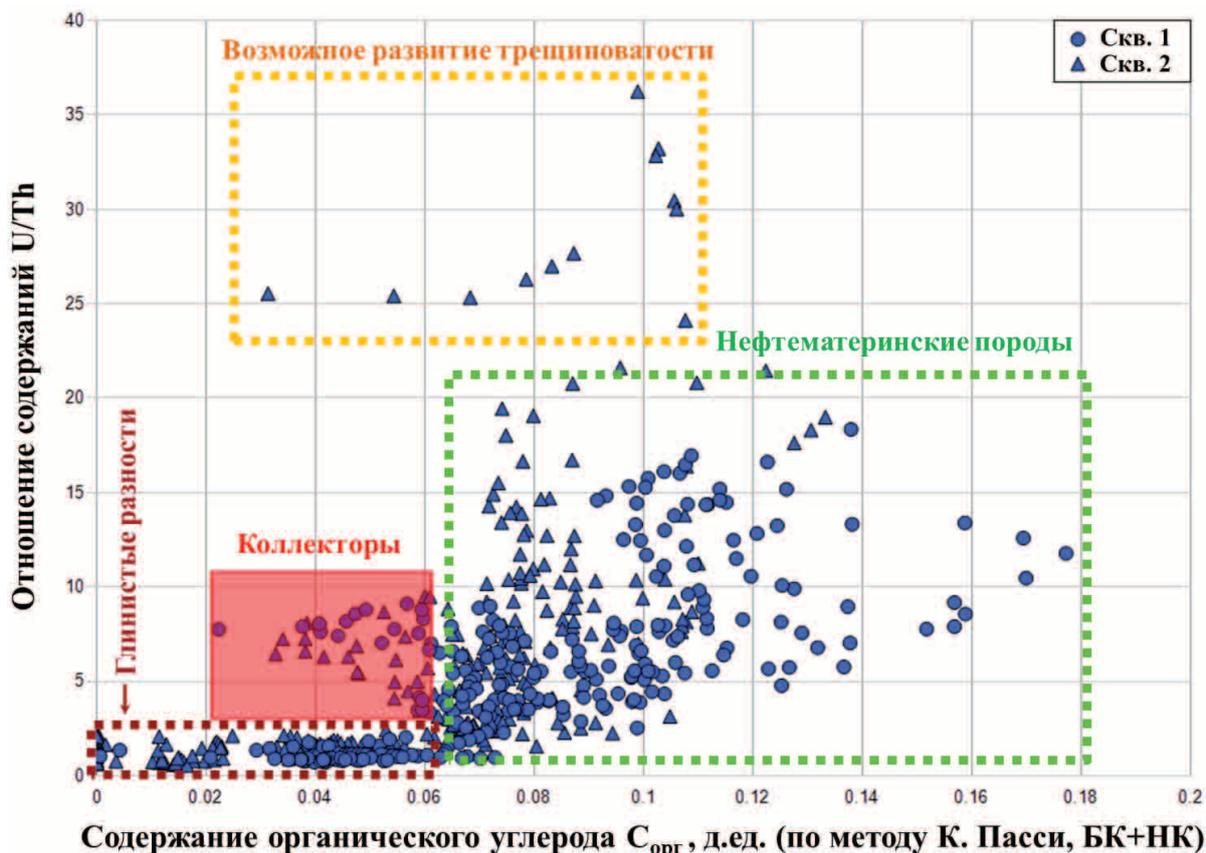


Рис. 3. Типизация пород баженовской свиты двух скважин Сургутского свода в поле параметров «отношение $U/Th-C_{орг}$ », по материалам ГИС. Красной областью выделены коллекторы, приуроченные к интервалам повышенной трещиноватости с низкими показателями бокового каротажа и суммарного водородосодержания; оранжевой пунктирной линией – интервалы возможной трещиноватости либо породы с аномально высоким содержанием органического вещества

Fig. 3. Rock type classification within the Bazhenov Formation in two wells of Surgut Arch in a domain of U/Th ratio vs. TOC, based on well-log data. The red area is corresponding to reservoir rocks mainly fractured and characterized by low laterolog resistivity and TOC; the intervals of possible fracture presence or abnormally organic-rich are marked with dotted orange line

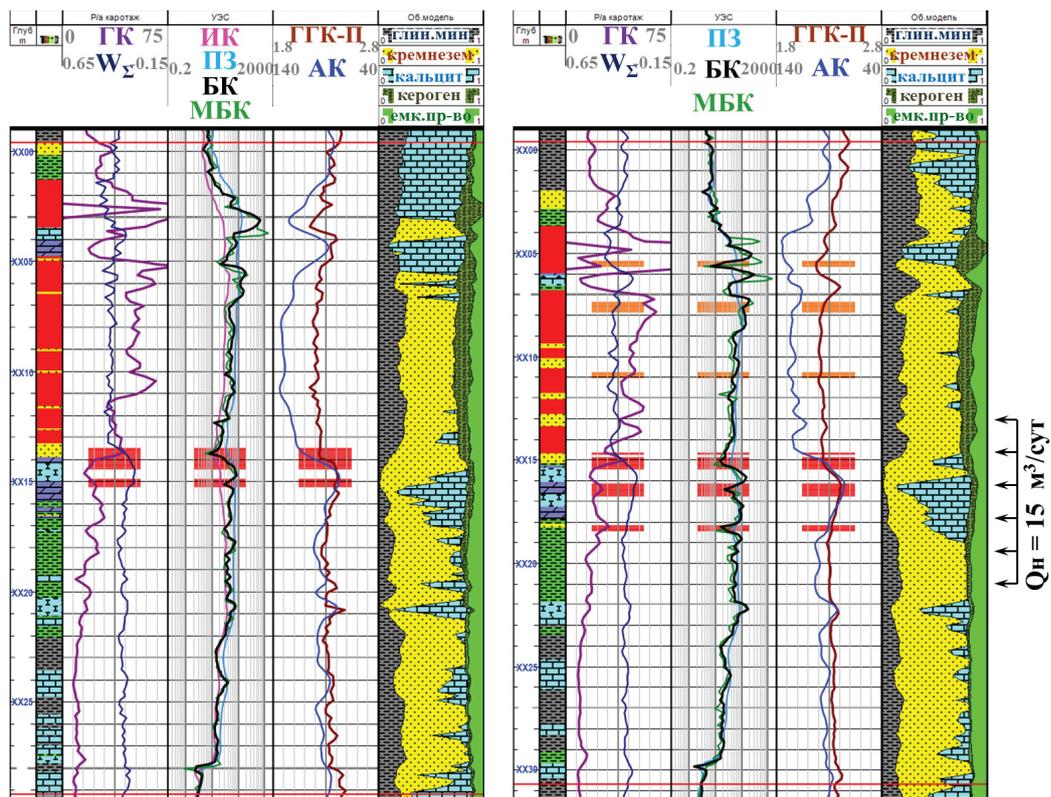


Рис. 4. Выделение коллекторов в разрезе двух скважин Сургутского свода на основе классификации, приведенной на рис. 3. Интервалы низкого C_{org} и повышенных значений U/Th показаны красным цветом, интервалы возможного развития трещиноватости, отмечающиеся anomalно высокими значениями U/Th – оранжевым

Fig. 4. Reservoir identification within Bazhenov Formation in two wells of Surgut Arch on the basis of classification given in Fig. 3. Intervals of low TOC and high values of U/Th are marked in red, the intervals of possible fracture presence with extremely high values of U/Th are marked in orange

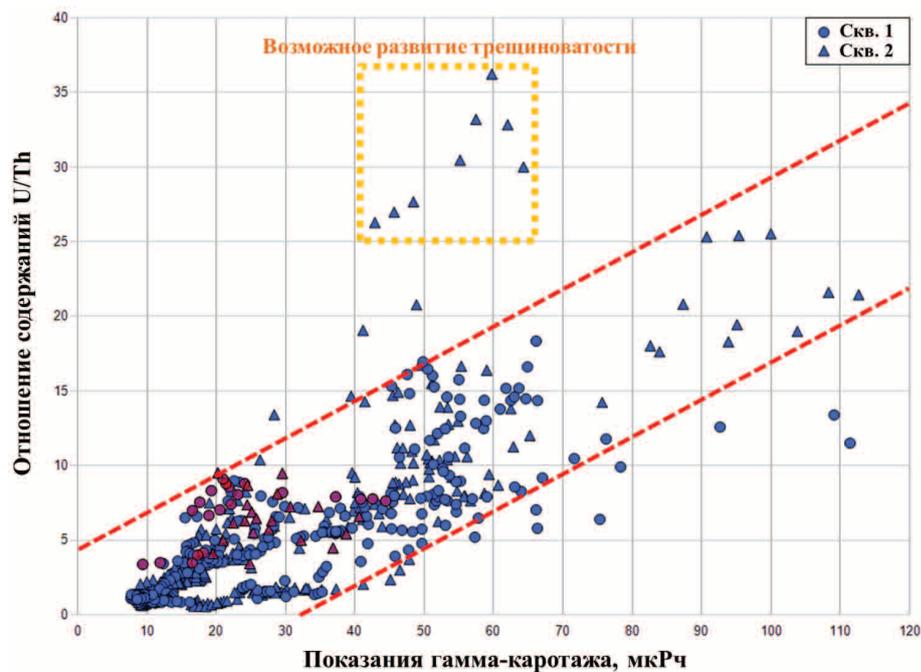


Рис. 5. Сопоставление интегральной радиоактивности пород баженовской свиты и значений отношения U/Th ; бордовыми точками обозначены коллекторы, выделенные красной областью на рис. 3

Fig. 5. Gamma ray vs. U/Th ratio in the Bazhenov Formation; the reservoirs colored in maroon are located inside the red rectangular in Fig. 3

примененную классификацию, переходя от спектральной модификации гамма-каротажа к интегральной. Таким образом, классификацию можно выполнить в поле параметров «показания ГК– $C_{орг}$ » (рис. 6).

В рамках рассматриваемой классификации коллекторы трех изучаемых скважин Красноленинского свода имеют показания ГК, изменяющиеся в диапазоне 20–35 мкР/ч и $C_{орг}$ – в диапазоне 0,5–3,5 вес. % и соответствуют слабоглинистым плотным карбонатизированным силицитам по классификации авторов [16] ($21 \text{ мкР/ч} < I_\gamma < 35 \text{ мкР/ч}$; $5 \% < W_\Sigma < 27,5 \%$).

Область глинистых слабобитуминозных пород (в которую также могут попадать чистые карбонаты) имеет пределы изменения показаний ГК 8–18 мкР/ч и $C_{орг}$ – 0–4 вес. %, область нефтематеринских пород – пределы изменения показаний ГК 20–65 мкР/ч и $C_{орг}$ 4–14 вес. %.

Скопления пирита чаще всего отмечаются в зонах с повышенным содержанием органического вещества, адсорбирующего уран, поэтому пиритизированные разности характеризуются аномально высокими показаниями ГК (более 40 мкР/ч). Однако оцененные по методике Пасси значения $C_{орг}$ в этих зонах получаются минимальными и не соответствующими реальному содержанию $C_{орг}$, что обусловлено аномально низким удельным электрическим сопротивлением пирита.

Важно отметить повышение неопределенности в оценке $C_{орг}$, связанное с тем, что она выполняется косвенно – из показаний методов ГИС, а степень достоверности в решении этой задачи существенно снижается при использовании интегральной модификации ГК по сравнению со спектральной. В этом случае оптимальным в скважинах с отсутствием спектральной модификации ГК будет применение упрощенного подхода в использовании описанной классификации (рис. 7).

Фертл [1] приводит уравнение связи (6) между естественной радиоактивностью и объемной плотностью пород для девонских сланцев США:

$$\delta_n = -1,2 \cdot 10^{-3} \cdot I_\gamma (\text{ед. API}) + 2,877. \quad (6)$$

Отклонение от этой связи означает наличие пиритизированных, карбонатизированных, высокопористых и др. пород в зависимости от тренда этого отклонения.

Нами в разрезе баженовской свиты семи скважин Красноленинского свода и двух скважин Сургутского свода была выявлена аналогичная зависимость (7) плотности и радиоактивности пород:

$$\delta_n = -4 \cdot 10^{-3} \cdot I_\gamma (\text{мкР/ч}) + 2,443 \quad (7)$$

и обоснованы тренды, соответствующие более интенсивному проявлению пиритизации и карбонатизации, увеличению содержания органического вещества, коэффициента пористости или диаметра скважины (рис. 8).

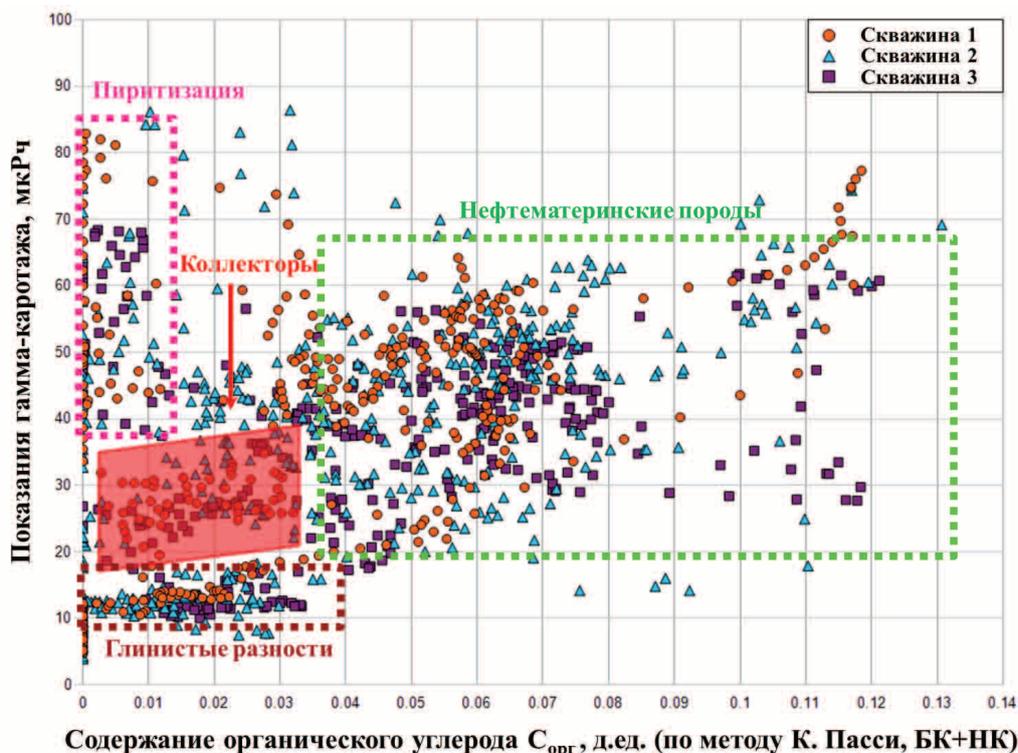


Рис. 6. Типизация пород баженовской свиты в трех скважинах Красноленинского свода в поле параметров «ГК– $C_{орг}$ » по материалам ГИС; красной областью обозначены коллекторы

Fig. 6. Classification of rocks of the Bazhenov Formation in three wells of Krasnoleninsky Arch in a domain of gamma ray vs. TOC, based on well-log data; reservoirs are marked with red area

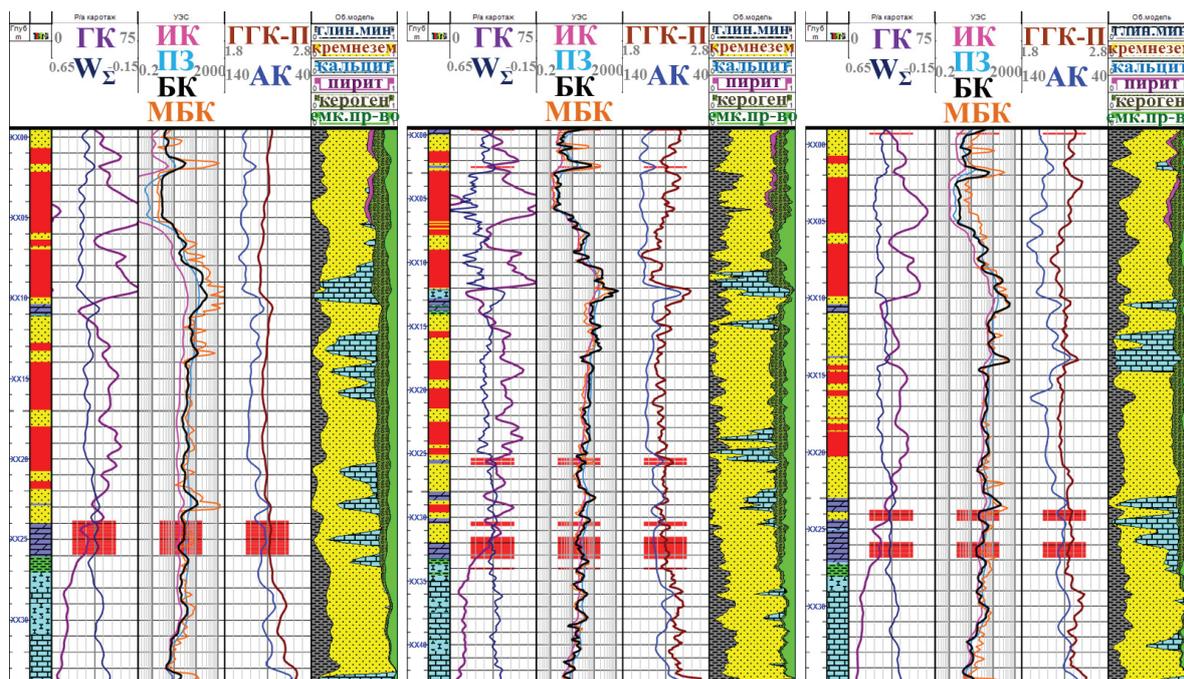


Рис. 7. Выделение коллекторов (показаны красным цветом) в разрезе трех скважин Красноленинского свода в соответствии с классификацией, приведенной на рис. 6

Fig. 7. Reservoir identification (in red) in three wells of Krasnoleninsky arch according to the classification in Fig. 6

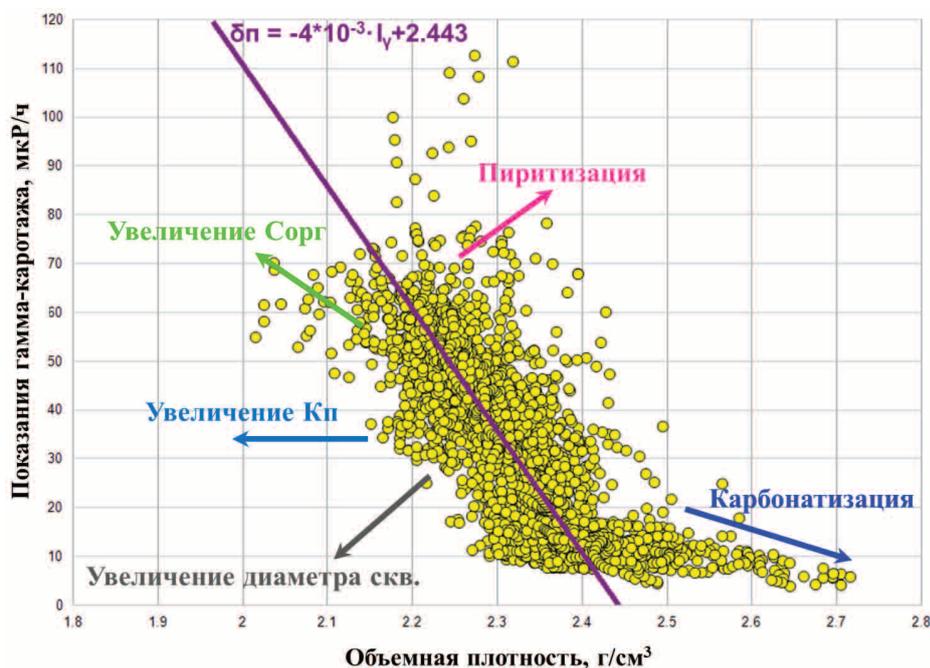


Рис. 8. Сопоставление естественной радиоактивности (показания ГК) и объемной плотности пород баженовской свиты

Fig. 8. Gamma ray vs. density log in the Bazhenov Formation

Сопоставление измеренной и рассчитанной из показаний ГК плотности показывает, что в определенном диапазоне изменения объемной плотности отмечается их хорошее соответствие. Расхождение этих кривых (рис. 9) в отдельных интервалах связано с некоторыми особенностями разреза баженовской свиты.

Превышение измеренных показаний ГГК-П над результатом расчета обусловлено увеличением:

- C_{org} при $I_{\gamma} > 50$ мкР/ч;
- коэффициента пористости $K_{п}$ при $25 < I_{\gamma} < 50$ мкР/ч;
- диаметра скважины при $I_{\gamma} < 25$ мкР/ч.

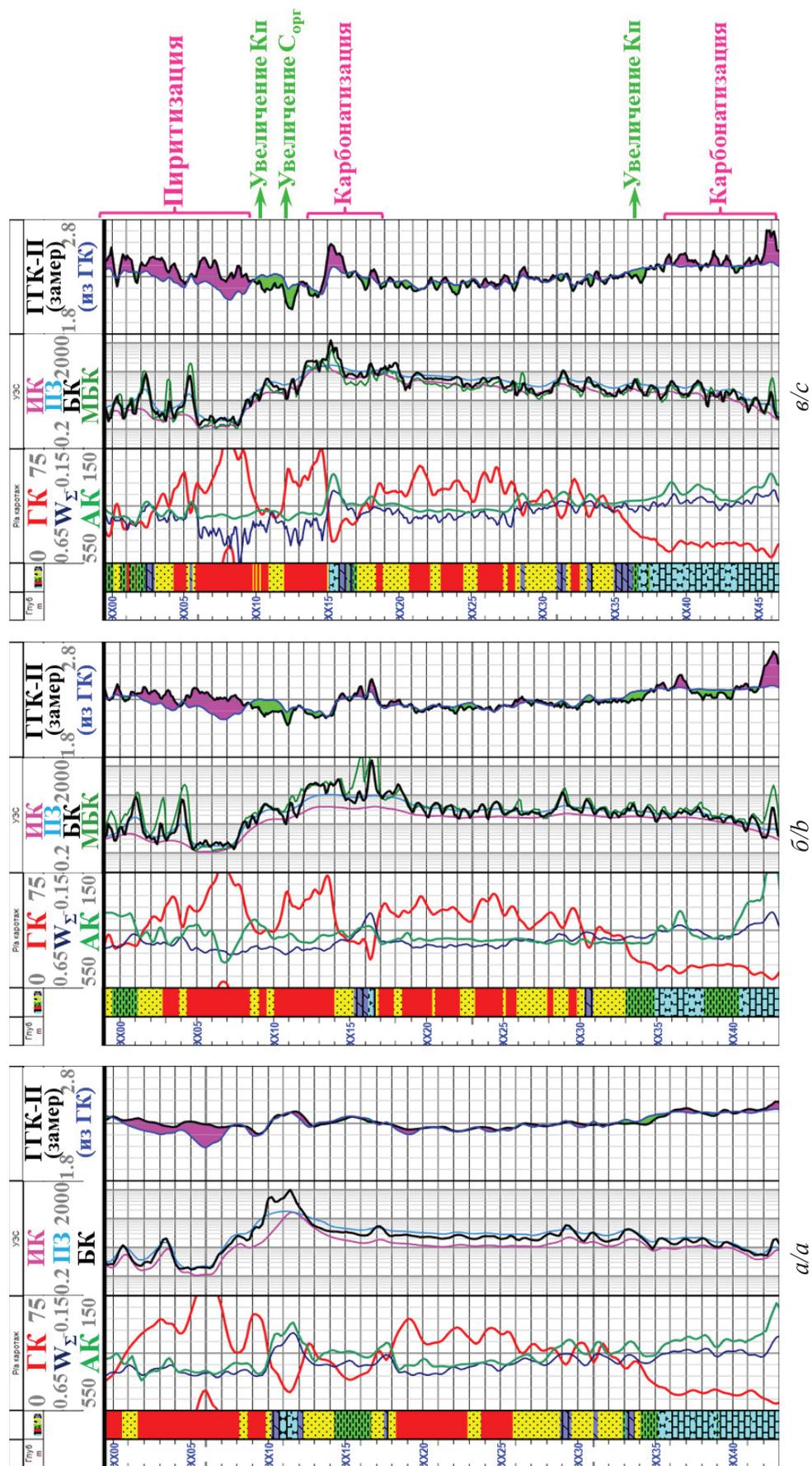


Рис. 9. Типизация пород баженовской свиты на основе сопоставления измеренной и рассчитанной ГК кривых объемной плотности
 Fig. 9. Petrotype classification within the Bazhenov Formation on the basis of matching density log acquired against gamma ray

Превышение результата расчета над измеренными показаниями ГГК-П обусловлено более интенсивной:

- пиритизацией при $I_{\gamma} > 50$ мкР/ч;
- карбонатизацией при $I_{\gamma} < 20$ мкР/ч.

При использовании такого сопоставления появляется возможность выделения коллекторов, которые представляют собой карбонатизированные прослои (соответствующие чистым известнякам и известнякам с примесью силикатного материала и органики по классификации, предложенной в [16]) и силициты, имеющие повышенную пористость, достаточную для того, чтобы порода обладала свойствами коллектора.

Приведенные на рис. 9 разрезы скважин иллюстрируют интересную особенность. В разрезе скважины (а), практически «сухой», наблюдается почти полное совпадение рассчитанной и измеренной кривой ГГК-П. В разрезах приточных скважин (б) и (в) отмечаются сильные «колебания» измеренной кривой ГГК-П относительно рассчитанной, и в них на основании классификации выделены карбонатизированные прослои и силициты с повышенным значением коэффициента пористости, которые могут являться коллекторами. Таким образом, косвенно подтверждается вывод о том, что чем выше неоднородность разреза баженовской свиты, тем более вероятна продуктивность скважины.

Комплексирование материалов ядра и ГИС при построении объемной модели горных пород баженовской свиты

Объемная модель горной породы представляет собой компонентный минералогический состав твердой части породы и флюида, заполняющего емкостное пространство, выраженный в объемных единицах по отношению к породе в целом. Она комплексно отображает изменение свойств и минерального состава пород с глубиной.

Породы баженовской свиты отличаются многокомпонентным минералогическим составом твердой фазы. Для построения их объемной модели требуется использование расширенного комплекса методов геофизических исследований скважин, с обязательным включением нейтронного, плотностного и акустического методов. В статьях [17, 18] описано использование статистического подхода (инверсии) и настройки алгоритма для построения объемной модели с помощью методов ГИС в разрезе баженовской свиты.

Стоит подчеркнуть важность комплексирования результатов минералогического анализа ядра и материалов ГИС при оценке объемного содержания компонент породы. Использование результатов исследований ядра зачастую носит косвенный характер – они применяются для оценки достоверности результатов интерпретации материалов ГИС. Однако при построении объемной модели горной породы есть возможность напрямую включать результаты исследований ядра, что было показано в работе [19]. Для этого требуется наличие

результатов изучения ядра, шлама или количественной оценки состава пород по шлифам при сплошном отборе образцов по глубине в изучаемом интервале разреза.

Сначала результаты «поточечных» исследований с неравномерным шагом квантования приводятся к виду кривой ГИС путем интерполяции значений между отдельными образцами. После этого уже сплошная кривая сглаживается трех- или пятиточечным фильтром скользящего среднего для устранения чрезмерной изрезанности.

Полученная кривая подается на вход алгоритма статистического моделирования с определенными пределами допуска – таким образом, алгоритм, помимо использования материалов ГИС при оценке содержания компонент горной породы, напрямую использует и данные изучения образцов ядра.

Результаты прямого подключения ядерной информации при использовании статистического подхода продемонстрированы на рис. 10, где показан пример построения объемной модели пород баженовской свиты в двух скважинах Салымского района с ограниченным комплексом ГИС и сплошным отбором ядра.

Использование результатов изучения образцов ядра в программах статистической инверсии методов ГИС позволяет получать наиболее детальную объемную модель породы и является непосредственным аналогом обработки и анализа сейсмического волнового поля с прямым включением скважинных данных (well-driven seismic processing and reservoir characterization), что позволяет повысить вертикальную разрешающую способность сейсмоки.

Эмпирический расчет упругих свойств и оценка хрупкости пород Баженовской свиты

Для оценки содержания органического углерода $C_{орг}$ по методу Пасси [10] достаточно наличия двух методов ГИС – нейтронного и бокового (чаще всего их запись присутствует даже в скважинах с ограниченным комплексом), нормализация которых выполняется в глинистых интервалах с низким содержанием органики. В методике Айслера [11] для расчета $C_{орг}$ показания методов в комбинациях ГГК-П+БК или АК+БК используются непосредственно (без нормировки).

Хорошая сопоставимость содержания органического углерода (рис. 2) при использовании различных методов его оценки по материалам ГИС является причиной обоснования применимости уравнений, предложенных Айслером [11, 13], для эмпирического расчета объемной плотности и интервального времени пробега продольных волн (рис. 11).

Формулы (8, 9) для эмпирического расчета могут быть выражены из уравнений (4) и (5):

$$\delta_n = \frac{\left(\frac{1}{-0,1429} \left(100 \frac{C_{орг} + 0,06}{0,92} - 45,14 \right) \times \right)}{\left(\lg \rho_n + 4,122 \right) + 1014} \cdot 1000; \quad (8)$$

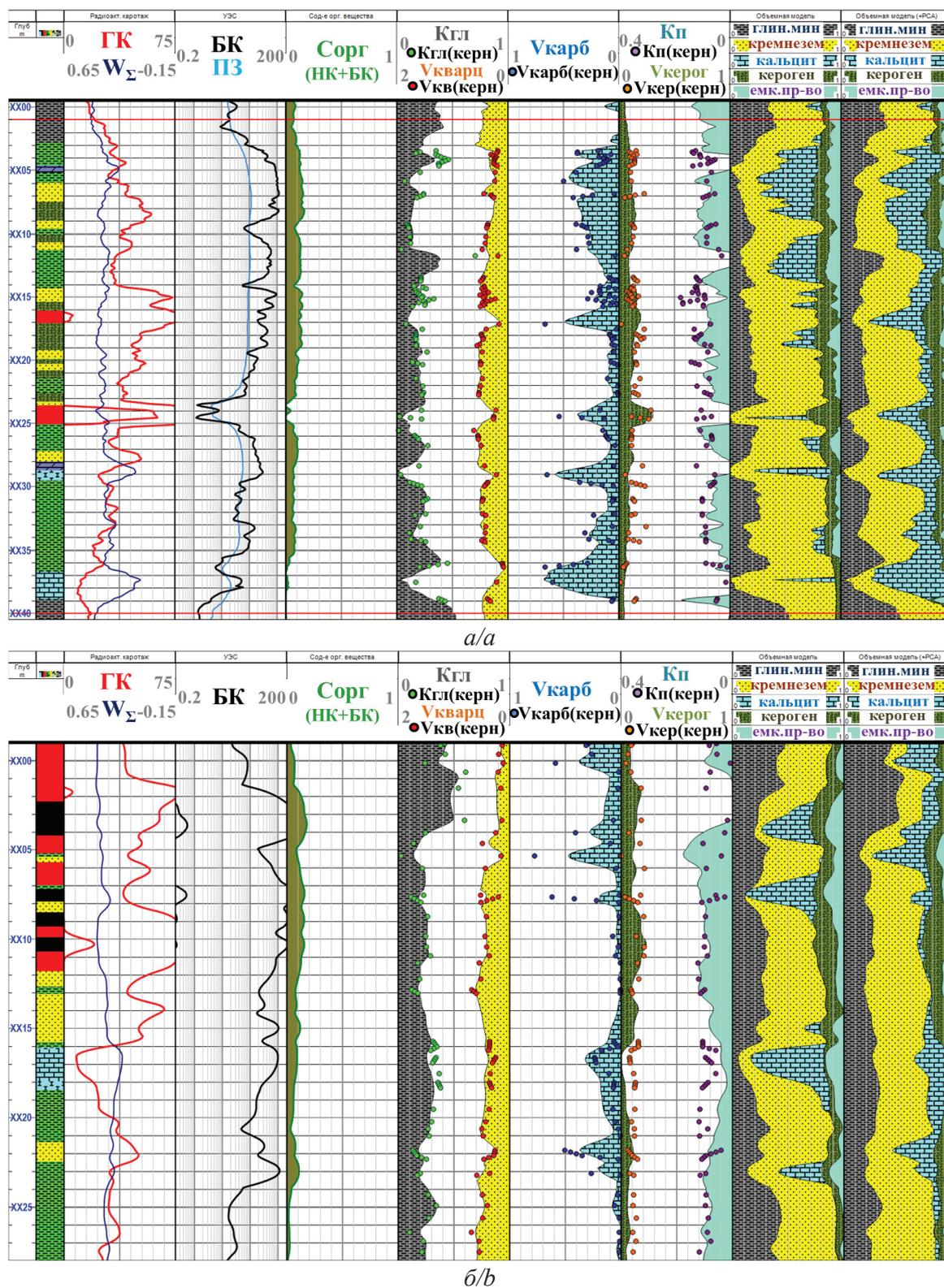


Рис. 10. Результаты прямого включения данных анализа керна в разрезе баженовской свиты в двух скважинах Салымского месторождения (а, б) с ограниченным комплексом ГИС (гамма-каротаж, нейтронный и боковой каротаж). В правой части планшета приведены объемные модели, полученные без подключения (предпоследняя колонка) и с прямым включением керновых данных (правая колонка)

Fig. 10. XRD core data direct introduction applied to the Bazhenov formation in two wells of the Salym oilfield (a, b) with limited logging suite (gamma ray, neutron log and laterolog). The right track of the table introduces three-dimensional models obtained without (last but one column) and with direct insertion of core-sample data (right column)

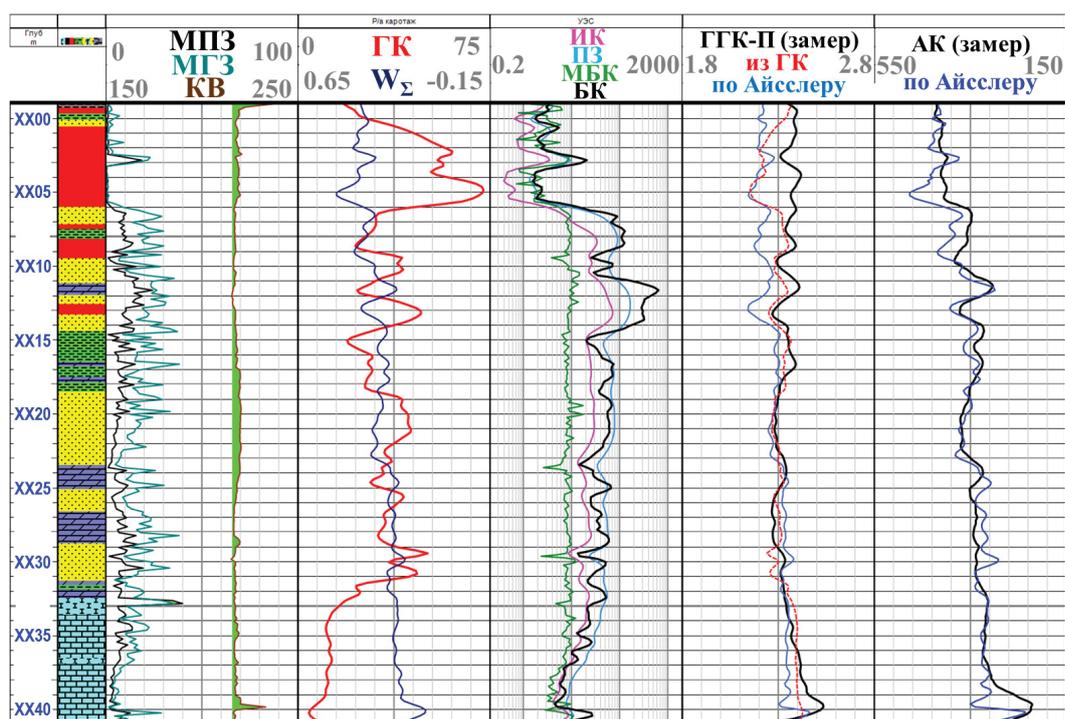


Рис. 11. Сопоставление измеренных плотности и интервального времени пробега продольных волн с результатами эмпирического расчета на планшете (два правых трека)

Fig. 11. Comparison of density and sonic logs acquired against empirically-derived logs on the logplot (two right tracks)

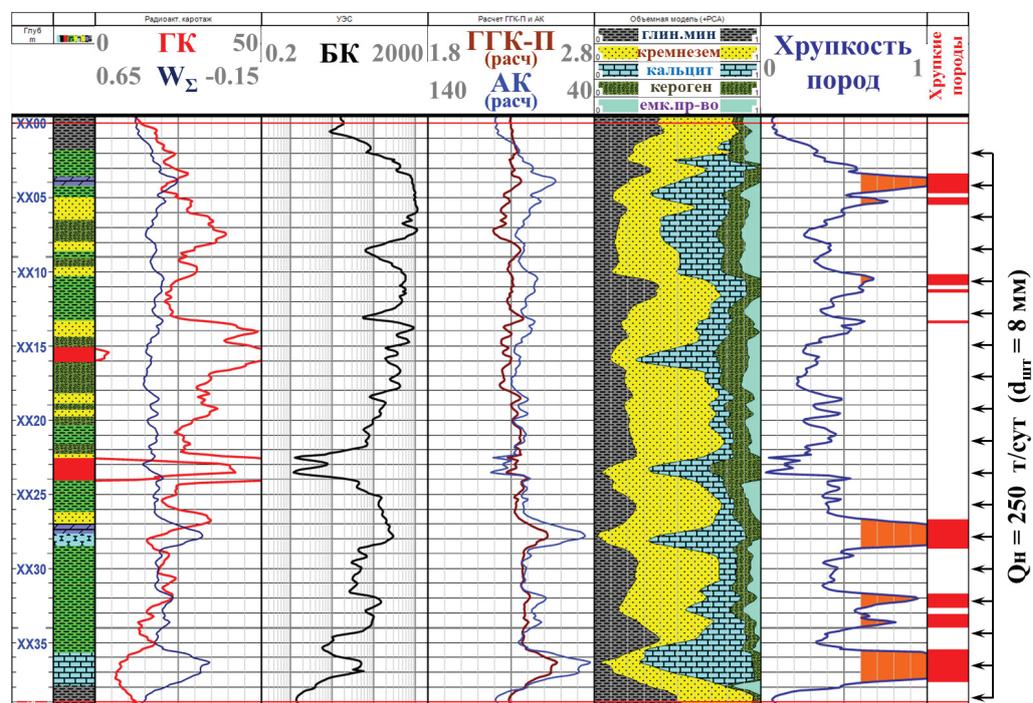


Рис. 12. Эмпирический расчет плотности и интервального времени пробега продольных волн и оценка хрупкости в разрезе баженовской свиты в скважине Салымского месторождения с ограниченным комплексом ГИС (гамма-каротаж, нейтронный и боковой каротажи). В правой колонке наиболее хрупкие интервалы показаны красным цветом

Fig. 12. Empirical calculation of density log and compressional slowness, and brittleness evaluation in the Bazhenov Formation in the well with limited logging suite (gamma ray, neutron log and laterolog) of the Salym oilfield. The most brittle intervals are marked with red in the right column

$$\Delta T_n = \frac{1}{0,0714} \left(100 \frac{C_{\text{орг}} + 0,01}{0,46} + 31,86 \right) - 195 \lg \rho_n. \quad (9)$$

Также для эмпирического расчета объемной плотности пород баженовской свиты может использоваться её зависимость (7) от показаний интегрального гамма-каротажа.

Наличие замеров плотностного и акустического методов необходимо для стратиграфической привязки сейсмических и скважинных данных. Также с помощью этих методов может решаться очень важная практическая задача – оценка хрупкости пород разреза при помощи анализа механических свойств: модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Р. Рикманом, Д. Бюллером и др. [20, 21] было показано, что рост хрупкости нетрадиционных сланцевых коллекторов отмечается при увеличении модуля Юнга и уменьшении коэффициента Пуассона. Для количественной оценки этого эффекта ими был предложен следующий параметр (уравнение 10), характеризующий хрупкость пород:

$$Brit = \frac{\left(\frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{v - v_{\max}}{v_{\min} - v_{\max}} \right)}{2}, \quad (10)$$

E и v – значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона; E_{\min} , E_{\max} и v_{\min} , v_{\max} – соответственно, минимальные и максимальные значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона в разрезе.

При использовании эмпирического расчета показаний плотностного и акустического методов появляется возможность выполнить оценку хрупкости пород разреза баженовской свиты даже в скважинах с ограниченным комплексом ГИС (рис. 12).

Выводы

В результате обобщения работ по исследованию нетрадиционных сланцевых коллекторов нефти и газа можно заключить, что основу их коллекторского потенциала составляет наличие текстурной неоднородности и связанных с ней хрупких пород. Развитие естественной трещиноватости является ключевым фактором, обуславливающим фильтрационные свойства пород баженовской свиты. При этом сланцевые коллекторы нефти и газа, обладающие повышенной трещиноватостью, характеризуются хорошими дренажными свойствами и

обеспечивают приток УВ в скважину при разработке. Для поддержания темпов добычи из низкопроницаемой матрицы должна осуществляться фильтрация нефти и газа по естественным или искусственно созданным (при гидроразрыве) трещинам.

Оценка содержания органического углерода с использованием методов ГИС может быть выполнена по методике Пасси путем нормализации показаний методов, отражающих изменение пористости, на показания метода сопротивления. Другим способом, позволяющим выполнять оценку $C_{\text{орг}}$ по материалам ГИС, является методика Айсслера, заключающаяся в непосредственном сопоставлении плотности δ_n , либо интервального времени ΔT_n , и сопротивления пород ρ_n .

Повышенная информативность спектральной модификации гамма-каротажа позволяет выполнить классификацию пород и выделение коллекторов в разрезе баженовской свиты по методам ГИС в поле параметров «отношение $U/Th - C_{\text{орг}}$ ». Эта классификация с повышением неопределенности может быть выполнена также с использованием показаний интегрального гамма-каротажа в поле параметров «показания $GK - C_{\text{орг}}$ ». Рассматривается другая классификация пород разреза баженовской свиты, подразумевающая сопоставление измеренной и рассчитанной из показаний GK плотности. На основании этой классификации в разрезе баженовской свиты выделены карбонатизированные прослойки и силициты с повышенной пористостью, которые могут являться потенциальными коллекторами.

Модификация уравнений, предложенных Д. Айсслером, применима для эмпирического расчета объемной плотности и интервального времени пробега продольных волн. Также для эмпирического расчета объемной плотности пород баженовской свиты может использоваться её зависимость от показаний интегрального гамма-каротажа.

С помощью плотностного и акустического методов может решаться очень важная практическая задача – оценка хрупкости пород разреза. При использовании эмпирического расчета показаний плотностного и акустического методов появляется возможность выполнить оценку хрупкости пород разреза баженовской свиты даже в скважинах с ограниченным комплексом ГИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fertl W.H., Rieke H.H. Gamma-ray spectral evaluation techniques identify fractured shale reservoirs and source-rock characteristics // *Journal of Petroleum Technology*. – 1980. – V. 32. – № 11. – P. 2053–2062.
2. Клубова Т.Т. Глинистые коллекторы нефти и газа. – М.: Недра, 1988. – 157 с.
3. Дудаев С.А. Информативность гамма-спектрометрии скважин при изучении глинистых коллекторов Предкавказья // *НТВ Каротажник*. – 2011. – № 7. – С. 84–101.
4. Анализ и обобщение результатов ГРП по глинистым коллекторам нижнего майкопа Предкавказья и оценка эффективности освоения этого нефтегазоносного комплекса / А.И. Копылов, П.А. Петренко, Ф.Г. Шарафутдинов и др. Отчет ФГУП «Севкавгеология», ООО «Инженерно геологический центр». Эссентуки–Железноводск, 2000.
5. Жарков А.М. Оценка потенциала сланцевых углеводородов России // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2011. – № 3. – С. 16–21.
6. Таруц Г.М., Гайдебурова Е.А. Строение нефтегазоносных отложений баженовской свиты Западно-Сибирской плиты в связи с

- особенностями тектоники верхнеюрского бассейна осадконакопления (на примере Салымского района) // в кн.: Цикличность осадконакопления нефтегазоносных бассейнов и закономерности размещения залежей. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1978. – С. 80–97.
7. Геологические основы и новые технологии прогнозирования залежей и оценка запасов нефти в отложениях баженовской свиты / А.Я. Фурсов, Е.В. Постников, А.В. Постников и др. // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. – Ханты-Мансийск, 2000. – С. 162–173.
 8. What is shale gas? An introduction to shale-gas geology in Alberta / C.D Rokosh., J.G. Pawlowicz, H. Berhane, S.D.A. Anderson, A.P. Beaton // Energy Resources Conservation Board. Alberta Geological Survey, ERCB/AGS Open File Report 2008–08, 26 p. URL: http://www.ags.gov.ab.ca/publications/ofr/pdf/ofr_2008_08.pdf (дата обращения: 01.02.2014).
 9. Цветков Л.Д., Цветкова Н.Л. Сланцевые углеводороды: библиографический обзор. – Ярославль: ОАО «НПЦ «Недра», 2012. – 297 с.
 10. A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs / Q.R. Passey, S. Creaney, J.B. Kulla et al. // The AAPG Bulletin. – 1990. – V. 74. – № 17. – P. 1777–1794.
 11. Заляев Н.З. Определение пористости и нефтенасыщенности карбонатных пород по данным электрического и радиоактивного каротажа // в кн.: Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа в Припятской впадине. – Минск: Наука и техника, 1970. – С. 92–97.
 12. Organic carbon content determined from well logs: examples from Cretaceous sediments of western Canada GSC Open File 4362 / D.R. Issler, K. Hu, J.D. Bloch, T.J. Katsube 2002. URL: <http://geogratias.gc.ca/api/en/nrcan-rncan/ess-sst/d9a3707d-03aa-542e-974e-0e45aa19e964.html> (дата обращения: 01.02.2014).
 13. Crain E.R. Crain's Petrophysical Handbook: Total Organic Carbon (TOC). URL: <http://spec2000.net/11-vshtoc.htm> (дата обращения: 01.02.2014).
 14. Вертиевец Ю.А. Геологическое обоснование освоения трудноизвлекаемых запасов нефти кероген-глинисто-силицистых пород баженовской свиты района Красноленинского свода: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2011. – 154 с.
 15. Дудаев С.А. Петрофизические предпосылки изучения глинистых коллекторов Предкавказья по данным гамма-спектрометрии керна // НТВ Каротажник. – 2011. – № 6. – С. 12–25.
 16. Комплексное изучение материалов керна и ГИС для выявления зон продуктивных коллекторов баженовской свиты в разрезах скважин / Т.Ф. Соколова, П.С. Куляпин, Н.В. Царева, В.А. Костерина // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014. – М.: ОАО «ЕАГЕ Геомодель», 2014. – С. 230–256.
 17. Куляпин П.С., Соколова Т.Ф. Использование статистического моделирования при интерпретации данных ГИС в нефтематеринских породах баженовской свиты Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 3. – С. 28–42.
 18. Adiguna H., Torres-Verd?n C. Comparative Study for the Interpretation of Mineral Concentrations, Total Porosity, and TOC in Hydrocarbon-Bearing Shale from Conventional Well Logs // SPE 166139. – 2013. – P. 1–20.
 19. A new approach to measuring rock properties data from cores and cuttings for reservoir and completions characterization: an example from the Bakken Formation / G.M. Oliver, C.V. Ly, G. Spence, H. Rael // Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions. – 2013. – V. 63. – P. 563–568.
 20. A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale / R. Rickman, M. Mullen, E. Petre et al. // SPE 115258. – 2008. – P. 1–11.
 21. Petrophysical Evaluation for Enhancing Hydraulic Stimulation in Horizontal Shale Gas Wells / D. Buller, S. Hughes, J. Market, D. Spain, T. Odumosu // SPE 132990. – 2010. – P. 1–21.

Поступила 31.03.2014 г.

UDC 550.832:553.983

RESERVOIR IDENTIFICATION IN THE BAZHENOV FORMATION FROM WELL LOG AND CORE DATA

Pavel S. Kulyapin,

CGG Vostok, 31b, Shabolovka Street, Moscow, 115162 Russia.

E-mail: pavel.kulyapin@gmail.com

Tatiana F. Sokolova,

Cand. Sc., Gubkin Russian State University of Oil and Gas,

65/1, Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russia.

E-mail: tfsokolova2013@yandex.ru

Unconventional oil and gas development is one of the most challenging subjects of contemporary times. Despite the fact that certain black shales were known to geologists as hydrocarbon-bearing source rocks since the XIX century, it is only in the late twentieth century that they have been considered as viable alternatives to conventional oil and gas resources.

This article provides a brief overview on the reservoir potential analysis of source rocks, as well as existing methods for evaluating the content of total organic carbon from well log data.

The purpose of the research is to develop new ways to identify reservoirs within the Bazhenov Formation by analyzing well log and core data. The paper considers several methods of rock type classification within the Bazhenov Formation derived from well logs: U/Th ratio vs. total organic carbon, Gamma Ray vs. total organic carbon, and Gamma Ray vs. Density Log.

Rock bulk volumes provide the basis for understanding the mineralogical composition and reservoir properties of a formation. The authors have proposed a technique of direct introduction of core analysis results to well logs in order to build up a more reliable bulk volume model of the Bazhenov Formation.

New empirical relations to compute the density and compressional slowness of the Bazhenov Formation rocks were proved. This allows us to estimate the mechanical properties and predict the most brittle zones within the formation. The example of the Salym Field well demonstrates mechanical properties analysis and prediction of the most brittle zones considered as sweet spots.

Key words:

Unconventionals, Bazhenov shale, source rocks, total organic carbon, reservoirs, fractures, Spectral Gamma Ray Log, petrotype classification, elastic properties, brittleness.

REFERENCES

1. Fertl W.H., Rieke H.H. Gamma-ray spectral evaluation techniques identify fractured shale reservoirs and source-rock characteristics. *Journal of Petroleum Technology*, 1980, vol. 32, no. 11, pp. 2053–2062.
2. Klubova T.T. *Glinistykh kolektory nefti i gaza* [Shale oil and gas reservoirs]. Moscow, Nedra Press, 1988. 157 p.
3. Dudaev S.A. *Informativnost gamma-spektrometrii skvazhin pri izuchenii glinistykh kolektorov Predkavkaziya* [Value of Spectral Gamma Ray Log for evaluation of shale reservoirs of the Ciscaucasia]. *Karotazhnik*, 2011, no. 7, pp. 84–101.
4. Kopyltsov A.I., Petrenko P.A., Sharafutdinov F.G. *Analiz i obobshchenie rezultatov GRR po glinistym kolektoram nizhnego maikopa Predkavkaziya i otsenka effektivnosti osvoeniya etogo neftegazonosnogo kompleksa* [Summary of the exploration for the Lower Maikop shale oil and gas of the Ciscaucasia and evaluation of its development efficiency]. *FGUGP Sevkhavgeologiya Report*. Essentuki–Zheleznovodsk, 2000.
5. Zharkov A.M. *Otsenka potentsiala slantsevykh uglevodorodov Rossii* [Evaluation of Russian shale oil and gas potential]. *Mine-ralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2011, no. 3, pp. 16–21.
6. Taruts G.M., Gaideburiva E.A. *Stroenie neftegazonosnykh otlozhnykh bazhenovskoy svity Zapadno-Sibirskoy plity v svyazi s osobennostyami tektoniki verkhneyurskogo basseina osadkonakopleniya (na primere Salymnogo raiona)* [Geology aspects of oil and gas play of the Bazhenov Formation in the West Siberian plate with regards to the features of the Upper Jurassic basin tectonics (examples from Salym area)]. *Tsiklichnost osadkonakopleniya neftegazonosnykh basseinov i zakonornosti razmeshcheniya zalezhey* [Cycle of sedimentation in oil and gas basins and laws of deposit location]. Novosibirsk, IGIG SD AS USSR Press, 1978. pp. 80–97.
7. Fursov A.Ya., Postnikov E.V., Postnikov A.V. *Geologicheskie osnovy i novye tekhnologii prognozirovaniya zalezhey i otsenka zapasov nefti v otlozheniyakh bazhenovskoy svity* [Geological fundamentals and new technologies to forecast and assess unconventional Bazhenov play]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO* [Ways of implementation of oil and gas potential in Khanty Mansiisk autonomous district]. Khanty Mansiisk, 2000. pp. 162–173.
8. Rokosh C.D., Pawlowicz J.G., Berhane H., Anderson S.D.A., Beaton A.P. What is shale gas? An introduction to shale-gas geology in Alberta // Energy Resources Conservation Board. Alberta Geological Survey, ERCB/AGS Open File Report 2008–08. 26 p. Available at: http://www.ags.gov.ab.ca/publications/ofr/pdf/ofr_2008_08.pdf (accessed 01 February 2014).
9. Tsvetkov L.D., Tsvetkova N.L. *Slantsevykh uglevodorodov: bibliograficheskiy obzor* [Shale hydrocarbons: Bibliographical review]. Yaroslavl, Nedra Publ., 2012. 297 p.
10. Passey Q.R., Creaney S., Kulla J.B. A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. *The AAPG Bulletin*, 1990, vol. 74, no. 17, pp. 1777–1794.
11. Zalyaev N.Z. *Opreделение poristosti i neftenasyshchennosti karbonatnykh porod po dannym elektricheskogo i radioaktivnogo karotazha* [Estimation of Porosity and Oil Saturation in Carbonates using Electrical and Nuclear Logs]. *Geofizicheskie metody poiskov i razvedki nefti i gaza v Pripyatskoy vpadine* [Geophysical techniques for searching and exploring oil and gas in Prepyatskaya cavity]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1970. pp. 92–97.
12. Issler D.R., Hu K., Bloch J.D., Katsube T.J. *Organic carbon content determined from well logs: examples from Cretaceous sediments of western Canada GSC Open File 4362*. 2002. Available at: <http://geogratias.gc.ca/api/en/nrcan-rncan/ess-sst/d9a3707d-03aa-542e-974e-0e45aa19e964.html> (accessed 01 February 2014).

13. Crain E.R. *Crain's Petrophysical Handbook: Total Organic Carbon (TOC)*. Available at: <http://spec2000.net/11-vshtoc.htm> (accessed 01 February 2014).
14. Vertievets Yu.A. *Geologicheskoe obosnovanie osvoeniya trudnoizvlekaemykh zapasov nefti kerogen-glinisto-silitsitovykh porod bazhenovskoy svity raiona Krasnoleninskogo svoda. Dis. Kand. nauk* [Geological background of the development of the Bahzenov kerogen-clay-silica unconventional shale of the Krasnoleninsky Arch. Cand. Diss.]. Moscow, 2011. 154 p.
15. Dudaev S.A. *Petrofizicheskie predposylki izucheniya glinistyykh kollektorov Predkavkaziya po dannym gamma-spektrometrii kerna* [Principles for petrophysical analysis of shale reservoirs of the Ciscaucasia using core Spectral Gamma-Ray]. *Karotazhnik*, 2011, no. 6, pp. 12–25.
16. Sokolova T.F., Kulyapin P.S., Tsareva N.V., Kosterina V.A. *Kompleksnoe izuchenie materialov kerna i GIS dlya vyavleniya zon productivnykh kollektorov bazhenovskoy svity v razrezakh skvazhin* [Integrated Analysis of Well and Core Data to Determine Sweet Spots in the Bazhenov Formation]. *Petrofizika slozhnykh kollektorov: problem i perspektivy – 2014* [Petrophysics of Tight and Unconventional Reservoirs: Challenges and Prospects 2014]. Moscow, EAGE Geomodel LLC, 2014. pp. 230–256.
17. Kulyapin P.S., Sokolova T.F. *Ispolzovanie statisticheskogo modelirovaniya pri interpretatsii dannykh GIS v neftematerinskikh porodakh bazhenovskoy svity Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii* [Statistical Well Log Analysis of the Bazhenov Formation]. *Tekhnologii Seismorazvedki*, 2013, no. 3, pp. 28–42.
18. Adiguna, H., Torres-Verd?n, C. Comparative Study for the Interpretation of Mineral Concentrations, Total Porosity, and TOC in Hydrocarbon-Bearing Shale from Conventional Well Logs. *SPE 166139*, 2013, pp. 1–20.
19. Oliver G.M., Ly C.V., Spence G., Rael H. A new approach to measuring rock properties data from cores and cuttings for reservoir and completions characterization: an example from the Bakken Formation. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2013, vol. 63, pp. 563–568.
20. Rickman, R., Mullen, M., Petre, E. A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE 115258*, 2008, pp. 1–11.
21. Buller, D., Hughes, S., Market, J., Spain, D., Odumosu, T. Petrophysical Evaluation for Enhancing Hydraulic Stimulation in Horizontal Shale Gas Wells. *SPE 132990*, 2010, pp. 1–21.

Received: 31 March 2014.

УДК 530.145

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МОЛЕКУЛЫ ФТОРМЕТАНА В ДИАПАЗОНЕ 2400–2800 см⁻¹

Болотова Ирина Баторовна,

аспирант каф. квантовой теории поля Физического факультета

Томского государственного университета,

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: irbol89@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью наличия информации о тонкой структуре спектров высокого разрешения молекул типа симметричного волчка с целью исследования фундаментальных физических свойств молекул данного типа. С этой целью экспериментально зарегистрированный в диапазоне 2400–2800 см⁻¹ спектр высокого разрешения молекулы CH₃F был исследован впервые. На основе метода оценки параметров резонансных взаимодействий между колебательными состояниями различных типов симметрии молекул типа симметричного волчка были учтены резонансные взаимодействия между исследуемыми состояниями $v_2+v_6(E)$ и $v_3+v_6(A_1, E)$.

Цель работы: теоретическое описание экспериментально спектров высокого разрешения молекулы фторметана в диапазоне инфракрасных полос $v_2+v_6(E)$, $v_3+v_6(A_1, E)$; оценка параметров резонансных взаимодействий между указанными состояниями и отыскание спектроскопических параметров, описывающих структуру спектра.

Методы исследования: методы ИК Фурье спектроскопии высокого разрешения, методы квантовой механики, методы теории неприводимых тензорных операторов, модель эффективных операторов колебательно-вращательного гамильтониана.

Результаты. Спектр молекулы фторметана впервые зарегистрирован в спектральном диапазоне 2400–2800 см⁻¹ с высоким разрешением. Структура локализованных в указанном диапазоне колебательно-вращательных полос $v_2+v_6(E)$ и $v_3+v_6(A_1, E)$ впервые описана на основе модели эффективных колебательно-вращательных операторов. Получен набор параметров колебательно-вращательного гамильтониана, позволяющий описывать структуру спектра. Учтены различные взаимодействия между состояниями. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для описания спектров высокого разрешения более высоколежащих состояний, а также и для решения более прикладных задач атмосферной оптики.

Ключевые слова:

Колебательно-вращательные спектры, фторметан, симметричный волчок, спектры высокого разрешения.

Введение

Фторметан является классическим примером молекулы типа симметричного волчка, тем самым представляя академический интерес в вопросе исследования спектров молекул данного типа. Кроме того, фторметан HFC-41 является важным звеном в процессах, ответственных за парниковый эффект, обладая при этом долгим временем жизни в атмосфере [1]. По этим причинам исследование инфракрасных спектров молекулы фторметана представляет интерес для решения прикладных задач атмосферной оптики и климатообразования. В связи с этим спектры молекулы исследовались на протяжении последних десятилетий методами теоретической [2–12] и экспериментальной [13–26] спектроскопии. Вращательные и колебательно-вращательные спектры молекулы CH₃F и её изотопических модификаций [27–37] были исследованы в микроволновом, субмиллиметровом [14, 20, 21] и инфракрасном диапазонах спектра (например, [13–26]). Вместе с тем наличие многочисленных резонансных взаимодействий между различными колебательными состояниями значительно усложняет задачу описания колебательно-вращательной структуры спектров [13]. В данной работе приводятся полученные впервые предварительные результаты исследования полиады сильно взаимодействующих колебательно-вращательных полос $v_2+v_6(E)$ и $v_3+v_6(A_1, E)$ молекулы ¹²CH₃F.

Детали эксперимента

Экспериментальный спектр высокого разрешения молекулы фторметана был зарегистрирован в Высшей политехнической школе Цюриха (Швейцария) на Фурье-спектрометре высокого разрешения Bruker IFS 125-NR при давлении 80 Па и длине пути поглощения 19,2 м. Максимальная разность хода 10 м определяет инструментальное разрешение как 0,001 см⁻¹. Для увеличения показателя сигнал–шум было усреднено 400 отдельных сканов. Полученный в результате спектр представлен на рисунке.

Интерпретация спектра молекулы

Молекула CH₃F является молекулой типа симметричного волчка. Колебания молекулы при операциях симметрии преобразуются по неприводимым представлениям группы C_{3v}. Как следствие, в инфракрасном диапазоне наблюдаются полосы симметрии A₁ и E. Правила отбора для колебательно-вращательных переходов имеют вид:

$$\Delta J=0, \Delta K=0 \text{ – для полос симметрии } A_1 \\ \text{(параллельных),}$$

$$\Delta J=0, \Delta K=\pm 1 \text{ – для полос симметрии } E \\ \text{(перпендикулярных).}$$

Таким образом, рассматриваемая комбинационная полоса v_2+v_6 имеет симметрию E. Полоса v_3+v_6 разбивается на компоненты (A₁+A₂+E), то

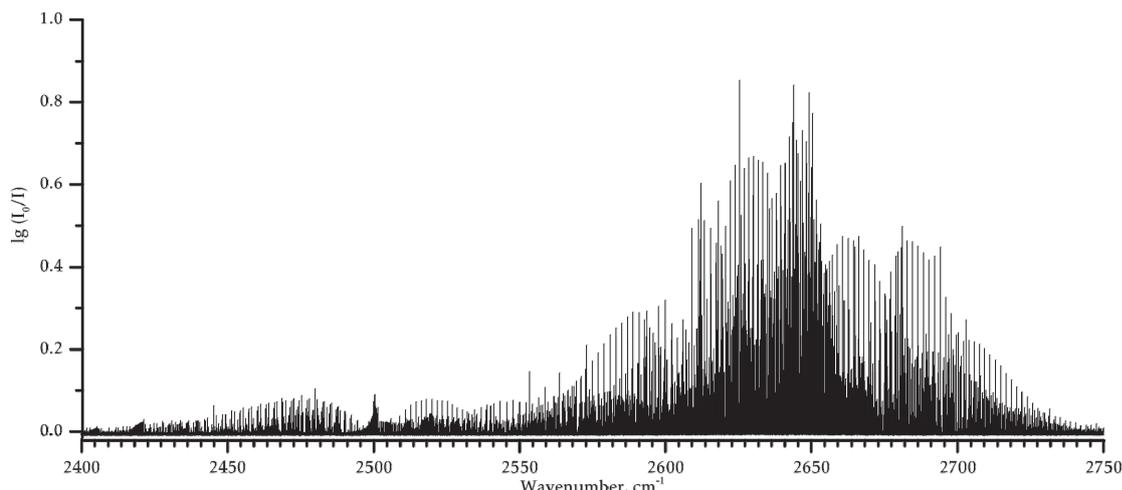


Рисунок. Спектр поглощения молекулы $^{12}\text{CH}_3\text{F}$ в диапазоне полос $\nu_2+\nu_6(A_1)$ и $\nu_5+\nu_6(A_1, E)$

Figure. Absorption spectrum of the molecule $^{12}\text{CH}_3\text{F}$ in the range of bands $\nu_2+\nu_6(A_1)$ and $\nu_5+\nu_6(A_1, E)$

есть имеет одну параллельную компоненту (симметрии A_1) и одну перпендикулярную компоненту (симметрии E), которые будут проявляться в инфракрасном диапазоне. В результате анализа, проведенного на основе метода комбинационных разностей с параметрами основного состояния, взятыми из работы [25], было интерпретировано 857 переходов в указанном диапазоне с максимальным значением квантовых чисел $J=30$ и $K=10$.

Модель эффективного гамильтониана

Как отмечалось ранее, все три состояния находятся в сильном взаимодействии, не позволяющем производить анализ спектров в модели изолированных состояний. Для учета указанных взаимодействий была использована модель гамильтониана в следующем виде:

$$H^{\text{vib.-rot.}} = \sum_{v, \tilde{v}} |v\rangle \langle \tilde{v} | H^v | \tilde{v} \rangle, \quad (1)$$

где суммирование производится по всем взаимодействующим колебательным состояниям. Диагональные блоки оператора (1), описывающие невозмущенную вращательную структуру колебательного состояния симметрии A_1 , имеют вид (2) [38]:

$$H^{A_1, A_1} = |A_1\rangle \langle A_1 | \{ E^a + B^a (J_x^2 + J_y^2) + C^a J_z^2 - D_J^a J^4 - D_{JK}^a J^2 J_z^2 - D_K^a J_z^4 + H_J^a J^6 + H_{JK}^a J^4 J_z^2 + H_{KJ}^a J^2 J_z^4 + H_K^a J_z^6 + L_J^a J^8 + L_{JK}^a J^6 J_z^2 + L_{JK}^a J^4 J_z^4 + L_{JKK}^a J^2 J_z^6 + L_K^a J_z^8 \dots \}. \quad (2)$$

Для описания структуры состояний симметрии E оператор гамильтониана записан в следующем виде (3):

$$H^{EE} = H_1^{EE} + H_2^{EE} + \dots, \quad (3)$$

где отдельные слагаемые могут быть представлены в следующем виде:

$$H_1^{EE} = (|E_1\rangle \langle E_1| + |E_2\rangle \langle E_2|) \{ E^e + B^e (J_x^2 + J_y^2) + C^e J_z^2 - D_J^e J^4 - D_{JK}^e J^2 J_z^2 - D_K^e J_z^4 + H_J^e J^6 + H_{JK}^e J^4 J_z^2 + H_{KJ}^e J^2 J_z^4 + H_K^e J_z^6 + L_J^e J^8 + L_{JK}^e J^6 J_z^2 + \dots \} + (|E_1\rangle \langle E_2| + |E_2\rangle \langle E_1|) \{ 2(C\zeta) J_z + \eta_J J_z J^2 + \eta_K J_z^3 + \eta_{JJ} J_z J^4 + \eta_{JK} J_z^3 J^2 + \eta_{KK} J_z^5 + \dots \},$$

и

$$H_2^{EE} = (|E_2\rangle \langle E_2| + |E_1\rangle \langle E_1|) \{ [iA, (J_+ - J_-)]_+ + [B, (J_+ + J_-)]_+ + [C, (J_+^2 + J_-^2)]_+ + [iD, (J_+^2 - J_-^2)]_+ \} + (|E_1\rangle \langle E_2| + |E_2\rangle \langle E_1|) \{ [A, (J_+ + J_-)]_+ + [iB, (J_- - J_+)]_+ + [iC, (J_+^2 - J_-^2)]_+ + [D, (J_+^2 + J_-^2)]_+ \},$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{2} \alpha_J J^2 + \alpha_K J_z^2 + \dots, \\ B &= \beta J_z + \beta_J J_z J^2 + \beta_K J_z^3 + \dots, \\ C &= \frac{1}{2} \gamma + \frac{1}{2} \gamma_J J^2 + \gamma_K J_z^2 + \dots, \\ D &= \delta J_z + \delta_J J_z J^2 + \delta_K J_z^3 + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Резонансные взаимодействия между состояниями ввиду их симметрии могут быть двух типов, Ферми и кориолиса. Так, состояние $(\nu_2=1, \nu_6=1; E)$ связано с состоянием $(\nu_5=1, \nu_6=1; E)$ резонансом Ферми, и каждое из указанных состояний связано с полносимметричным состоянием $(\nu_5=1, \nu_6=1; A_1)$ кориолисовым взаимодействием. Блок гамильтониана, который описывает взаимодействие между состояниями симметрии A_1 и E , имеют следующий вид:

$$H^{A,E} = |A_1\rangle\langle E_1| \{ [i\tilde{A}, (J_+ - J_-)]_+ + [\tilde{B}, (J_+ + J_-)]_+ + [\tilde{C}, (J_+^2 + J_-^2)]_+ + [i\tilde{D}, (J_-^2 - J_+^2)]_+ \} + |A_1\rangle\langle E_2| \{ [\tilde{A}, (J_+ + J_-)]_+ + [i\tilde{B}, (J_- - J_+)]_+ + [i\tilde{C}, (J_+^2 - J_-^2)]_+ + [\tilde{D}, (J_+^2 + J_-^2)]_+ \}. \quad (5)$$

Таблица 1. Значения спектроскопических параметров полос $\nu_2 + \nu_6(E)$, $\nu_5 + \nu_6(A_1)$ и $\nu_5 + \nu_6(E)$ *

Table 1. Values of spectroscopic parameters of the bands $\nu_2 + \nu_6(E)$, $\nu_5 + \nu_6(A_1)$ and $\nu_5 + \nu_6(E)$ *

Параметр Parameter	($\nu_2=1, \nu_6=1; E$)	($\nu_5=1, \nu_6=1; A_1$)	($\nu_5=1, \nu_6=1; E$)
E	2470,9966 (3)	2637,7484 (5)	2654,9859 (9)
A	0,861904(96)	0,845832 (75)	0,849027 (11)
B	5,182003 (128)	4,32874 (41)	5,577754 (9)
$D_J \cdot 10^5$	0,20086	0,20086	0,20086
$D_{JK} \cdot 10^4$	0,146625	0,146625	0,146625
$D_K \cdot 10^4$	0,70279	0,70279	0,70279
$H_J \cdot 10^{11}$	-0,10421	-0,10421	-0,10421
$H_{JK} \cdot 10^{10}$	0,60234	0,60234	0,60234
$H_{KJ} \cdot 10^9$	0,71415	0,71415	0,71415
C_s	0,080 (1)		0,240 (8)
$\eta_J \cdot 10^2$			-0,128 (40)
$\alpha \cdot 10^2$			0,49 (8)
$\alpha_J \cdot 10^4$			-0,391 (15)

* В скобках приведены значения 1-сигма статистических доверительных интервалов. Значения параметров, для которых доверительные интервалы не приведены, были фиксированы соответствующими значениями параметров основного состояния из работы [26].

* The values of 1-sigma statistic confidence intervals are given in brackets. The values without confidence intervals were fixed by the proper values of the parameters of the main state from the paper [26].

В этом случае операторы с тильдой в гамильтониане (5) могут быть выражены аналогично выражению (4), если соответствующие коэффициенты заменить на коэффициенты $\{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}, \tilde{\delta}\}$. Наконец, взаимодействие типа Ферми между состояниями E

симметрии описывается следующим блоком гамильтониана:

$$H^F = F + F_K J_z^2 + F_J J^2 + \dots + F_{xy} J_{xy}^2 + F_{xyK} [J_{xy}^2, J_z^2] + F_{xyJ} J_{xy}^2 J^2 + \dots$$

Значения параметров кориолисова искажения для полос симметрии E могут быть оценены из соответствующих значений параметров фундаментальных полос [39, 40], ν_5 , ν_6 , и ν_2 . Структура указанных состояний была ранее исследована в литературе [21, 24, 26] и значения соответствующих параметров гамильтониана состояний ($\nu_2=1$), ($\nu_5=1$) и ($\nu_6=1$) были взяты из работы [26].

Таблица 2. Значение резонансных параметров молекулы CH_3F (в см⁻¹) *

Table 2. Values of resonance parameters of a molecule CH_3F (cm⁻¹) *

Взаимодействие/Interaction			
$\nu_5 + \nu_6(A_1/E)$		$\nu_2 + \nu_6(E)/\nu_5 + \nu_6(E)$	
$\tilde{\alpha}$	0,422195 (44)		
$\tilde{\alpha}_J \cdot 10^4$	-0,1846 (2)	F_J	0,0328 (5)
$\tilde{\alpha}_K \cdot 10^4$	4,424 (8)		

* В скобках приведены значения 1-сигма статистических доверительных интервалов.

* The values of 1-sigma statistic confidence intervals are given in brackets.

Заключение

Спектр высокого разрешения молекулы CH_3F был экспериментально зарегистрирован и проанализирован в спектральном диапазоне 2400–2800 см⁻¹. В результате проделанной работы удалось получить параметры эффективного колебательно-вращательного гамильтониана молекулы для состояний $\nu_2 + \nu_6(E)$, $\nu_5 + \nu_6(A_1, E)$, табл. 1, а также параметры, описывающие резонансные взаимодействия между указанными состояниями, табл. 2. Найденный набор параметров позволяет воспроизвести исходные экспериментальные данные с точностью, близкой к точности эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Blowers P., Hollingshead K. Estimation of global warming potentials from computational chemistry calculations for CH_2F_2 and other fluorinated methyl species verified by comparison to experiment. *J. Phys. Chem. A*, 2009, vol. 113, pp. 5942–5950.
2. Aldous J., Mills I.M. The calculation of force constants and normal co-ordinates – II. Methyl fluoride. *Spectrochim. Acta*, 1962, vol. 18, pp. 1073–1091.
3. Blom C.E., Müller A. A study on the GVFF of CHF_3 , CH_2F_2 , and CH_3F . *J. Mol. Spectrosc.*, 1978, vol. 70, pp. 449–458.
4. Kondo S., Koga Y., Nakanaga T. Ab initio MO calculation of the anharmonic force field of methyl fluoride and methyl chloride. *J. Chem. Phys.*, 1984, vol. 81, pp. 1951–1959.
5. Dunn K.M., Boggs J.E., Pulay P. Vibrational energy levels of methyl fluoride. *J. Chem. Phys.*, 1987, vol. 86, pp. 5088–5093.
6. Law M.M., Duncan J.L., Mills I.M. The general harmonic force field of methyl fluoride. *J. Mol. Struct. (Theochem.)*, 1992, vol. 260, pp. 323–331.

7. De Azevedo A.L.M.S., Neto B.B., Scarminio I.S., De Oliveira A.E., Bruns R.E. A chemometric analysis of ab initio vibrational frequencies and infrared intensities of methyl fluoride. *J. Comp. Chem.*, 1996, vol. 17, no. 2, pp. 167–177.
8. Law M.M. Joint local- and normal-mode studies of the overtone spectra of the methyl halides: CH_3F , CH_3Cl , CH_3Br , CD_3Br , and CH_3I . *J. Chem. Phys.*, 1999, vol. 111, pp. 10021–10033.
9. Atkinson I.A., Law M.M. The anharmonic potential energy surface of methyl fluoride. *Spectrochim. Acta. A*, 2002, vol. 58, pp. 873–885.
10. Manson S.A., Law M.M. General internal coordinate gradient vectors and the vibrational kinetic energy operator of centrally-connected penta-atomic systems. P. I. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2006, vol. 8, pp. 2848–2854.
11. Manson S.A., Law M.M., Atkinson I.A., Thomson G.A. The molecular potential energy surface and vibrational energy levels of methyl fluoride. P. II. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2006, vol. 8, pp. 2855–2865.
12. Nikitin A.V., Rey M., Tyuterev V.G. Rotational and vibrational energy levels of methyl fluoride calculated from a new potential

- energy surface. *J. Mol. Spectrosc.*, 2012, vol. 274, pp. 28–34.
13. Smith W.L., Mills I.M. Vibration-rotation spectra of CH_3F . *J. Mol. Spectrosc.*, 1963, vol. 11, pp. 11–38.
 14. Tanaka T., Hirota E. Microwave spectrum of methyl fluoride in excited vibrational states. Coriolis interaction and anomalous l-doubling transitions. *J. Mol. Spectrosc.*, 1975, vol. 54, pp. 437–446.
 15. Giguere J., Overend J. The i.r. rotation-vibration spectrum of CH_3F in the region of 3000 cm^{-1} . *Spectrochim. Acta*, 1976, vol. 32A, pp. 241–262.
 16. Graner G., Guelachvili G. Extensive high-resolution study of the crowded rovibrational CH_3F spectrum around 3000 cm^{-1} . *J. Mol. Spectrosc.*, 1981, vol. 89, pp. 19–41.
 17. Champion J.P., Robiette A.G., Mills I.M., Graner G. Simultaneous analysis of the ν_1 , ν_4 , $2\nu_2$, $\nu_2+\nu_5$, and $2\nu_5$ infrared bands of the $^{12}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1982, vol. 96, pp. 422–441.
 18. Abouaf-Marguin L., Gauthier-Roy B., Dupre J., Meyer C. IR high-resolution spectroscopy of the ν_3 and ν_6 modes of CH_3F and CD_3F isolated in nitrogen and neon matrices: intramolecular V-V transfer. *J. Mol. Spectrosc.*, 1985, vol. 100, pp. 347–356.
 19. Badaoui M., Champion J.P. Weighted least squares, polyad analyses, and theoretical consistency. A demonstrative example: the $^{12}\text{CH}_3\text{F}$ molecule. *J. Mol. Spectrosc.*, 1985, vol. 109, pp. 402–411.
 20. Brown F.X., Dangoisse D., Gadhi J., Wlodarczyk G., Demaison J. Millimeter-wave and submillimeter-wave spectroscopy of methyl fluoride. *J. Mol. Struct.*, 1988, vol. 190, pp. 401–407.
 21. Pracna P., Papousek D., Belov S.P., Tretyakov M.Yu., Sarka K. Submillimeter-wave spectra of $^{12}\text{CH}_3\text{F}$ in the $\nu_2=1$ and $\nu_5=1$ vibrational states. *J. Mol. Spectrosc.*, 1991, vol. 146, pp. 120–126.
 22. Papousek D., Tesar R., Pracna P., Civic S., Winnewisser M., Belov S.P., Tretyakov M.Yu. High-resolution Fourier transform and submillimeter-wave study of the ν_6 band of $^{12}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1991, vol. 147, pp. 279–299.
 23. Papousek D., Ogilvie J.F., Civic S., Winnewisser M. The vibration-rotation bands ν_3 , $2\nu_3-\nu_3$, and $\nu_3+\nu_6-\nu_6$ of H_3^{12}CF . *J. Mol. Spectrosc.*, 1991, vol. 149, pp. 109–124.
 24. Papousek D., Papoukova Z., Ogilvie J.F., Pracna P., Civic S., Winnewisser M. Vibration-rotational interactions in the states $\nu_2=1$ and $\nu_5=1$ of H_3^{12}CF . *J. Mol. Spectrosc.*, 1992, vol. 153, pp. 145–166.
 25. Papousek D., Hsu Y.-C., Chen H.-S., Pracna P., Klee S., Winnewisser M., Demaison J. Far infrared spectrum and ground state parameters of $^{12}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1993, vol. 159, pp. 33–41.
 26. Papousek D., Pracna P., Winnwisser M., Klee S., Demaison J. Simultaneous rovibrational analysis of the ν_2 , ν_3 , ν_5 , and ν_6 , band of H_3^{12}CF . *J. Mol. Spectrosc.*, 1999, vol. 196, pp. 319–323.
 27. Hegelund F., Brodersen S., Mills I.M. The ν_2 , ν_5 raman band system of $^{12}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1978, vol. 70, pp. 386–393.
 28. Lee S.K., Schwendeman R.H., Magerl G. Infrared microwave sideband laser spectroscopy of the ν_3 and $2\nu_3-\nu_3$ bands of $^{13}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1986, vol. 117, pp. 416–434.
 29. Papousek D., Tesar R., Pracna P., Kauppinen J., Belov S.P., Tretyakov M.Yu. High-resolution Fourier transform and submillimeter-wave spectroscopy of the ν_3 and $2\nu_3-\nu_3$ bands of $^{13}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1991, vol. 146, pp. 127–134.
 30. Papousek D., Papoukova Z., Hsu Y.-C., Pracna P., Klee S., Winnewisser M., Demaison J. Determination of A_0 and D_0^k of $^{13}\text{CH}_3\text{F}$ from the $\Delta k=\pm 2$ forbidden transitions to the $\nu_5=1$ vibrational level. *J. Mol. Spectrosc.*, 1993, vol. 159, pp. 62–68.
 31. Bocquet R., Chen W.D., Papousek D., Wlodarczyk G., Demaison J. The submillimeter-wave rotational spectra of $^{12}\text{CD}_3\text{F}$, $^{13}\text{CD}_3\text{F}$, CH_2Br , and $\text{CH}_2\text{C}=\text{CH}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1994, vol. 164, pp. 456–472.
 32. Demaison J., Cosleou J., Papousek D., Hsu Y.-C. Submillimeter-wave spectroscopy of the rotational transitions in the $\nu_6=1$ vibrational state of $^{13}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1994, vol. 167, pp. 474–476.
 33. Papousek D., Demaison J., Wlodarczyk G., Cosleou J., Pracna P., Klee S., Winnewisser M., Belov S.P., Tretyakov M.Yu. Rotational spectra of $^{13}\text{CH}_3\text{F}$ in the $\nu_2=1$ and $\nu_5=1$ vibrational state. *J. Mol. Spectrosc.*, 1994, vol. 164, pp. 338–350.
 34. Papousek D., Demaison J., Wlodarczyk G., Pracna P., Klee S., Winnewisser M. High-resolution Fourier transform infrared spectrum of the ν_2/ν_5 fundamental band system of $^{13}\text{CH}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1994, vol. 164, pp. 351–367.
 35. Sudhakaran G.R., Coulson E.K., Jackson M. Laser stark spectroscopy of $^{13}\text{CH}_3\text{F}$. *Int. J. Inf. Millim. Waves*, 1995, vol. 16, no. 8, pp. 1329–1333.
 36. Lummla J., Halonen L., Merke I., Demaison J. Combined analysis of the rotational and infrared spectra of four fundamentals, $\nu_2(\text{A}_1)$, $\nu_3(\text{A}_1)$, $\nu_5(\text{E})$, and $\nu_6(\text{E})$, in $^{12}\text{CD}_3\text{F}$ and $^{13}\text{CD}_3\text{F}$. *J. Mol. Spectrosc.*, 1996, vol. 179, pp. 125–136.
 37. Papousek D., Winnwisser M., Klee S., Demaison J., Pracna P. Simultaneous rovibrational analysis of the ν_2 , ν_3 , ν_5 , and ν_6 , band of H_3^{13}CF . *J. Mol. Spectrosc.*, 1998, vol. 192, pp. 220–227.
 38. Ulenikov O.N., Malikova A.B., Alanko S., Koivusaari M., Antilla R. High-resolution study of the $2\nu_5$ hybrid band of the CHD_3 molecule. *J. Mol. Spectrosc.*, 1996, vol. 179, pp. 175–194.
 39. Boyd D.R.J., Longuet-Higgins H.C. Coriolis interaction between vibration and rotation in symmetric top molecules. *Proc. Roy. Soc.*, 1952, vol. 213, pp. 55–73.
 40. Graner G. Localized resonances in CH_3F and their influence on vibrational energy transfer. *J. Phys. Chem.*, 1979, vol. 83, no. 11, pp. 1491–1499.

Поступила 08.12.2014 г.

Received: 08 December 2014.

UDC 530.145

ANALYSIS OF THE HIGH-RESOLUTION SPECTRA OF METHYL FLUORIDE IN THE REGION OF 2400–2800 cm⁻¹

Irina B. Bolotova,

Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ir-
bol89@mail.ru

The relevance of the current research is caused by the need of knowledge about the high resolution ro-vibrational spectra of the symmetric top molecules, which is an essential doorway towards the understanding of the fundamental physical properties of this type of molecules. For that reason an experimental spectrum of CH₃F molecule was measured for the first time with the high resolution and analyzed in the range of 2400–2800 cm⁻¹. Estimation method for the values of spectroscopic parameters was used to describe numerous resonance interactions between the states $v_2+v_6(E)$ and $v_5+v_6(A_1, E)$, which are the subject of the present research.

The main aim of the study is theoretical description of the experimental high-resolution spectra of the trifluoromethane molecule in the range of infrared bands $v_2+v_6(E)$ and $v_5+v_6(A_1, E)$; the resonance interaction parameters between mentioned states are estimated and found out fitting procedure as well as the spectroscopic parameters describing the spectrum structure.

The methods used: methods of the Fourier-transform high resolution spectroscopy, methods of quantum mechanics, methods of the irreducible tensorial sets theory, model of the effective ro-vibrational hamiltonian operators.

The results obtained. The high-resolution spectrum of methyl fluoride molecule was registered in the spectral region of 2400–2800 cm⁻¹ for the first time. The structure of the ro-vibrational bands $v_2+v_6(E)$ and $v_5+v_6(A_1, E)$ was described with the model of effective ro-vibrational operators. The author has obtained the set of spectroscopic parameters, which defines the structure of the spectrum. The resonance interactions between the different states are included in the model. The results obtained can be further used for describing the highly excited ro-vibrational states of the molecule as well as for more applied problems of atmospheric optics.

Key words:

Ro-vibrational spectra, methyl fluoride, symmetric top, high resolution spectra.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ДЛИННЫХ СТЕРЖНЕЙ СО СЛОИСТО-РАЗНЕСЕННЫМИ ПРЕГРАДАМИ

Герасимов Александр Владимирович,

д-р физ.-мат. наук, профессор каф. теоретической и промышленной
теплотехники Энергетического института Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью защиты космической техники от техногенных осколков.

Цель работы: обоснование применимости трехмерной численной методики, базирующейся на лагранжевом подходе к описанию поведения сплошной среды и вероятностном подходе к фрагментации твердых тел при ударном нагружении применительно к проблеме защиты космических и наземных объектов комбинированными преградами при взаимодействии с удлиненными ударниками-стержнями.

Методы исследования: вычислительный эксперимент с привлечением экспериментальных данных для верификации численных результатов.

Результаты: Вероятностный подход и предложенная в работе численная методика в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке позволяют с достаточно высокой точностью воспроизводить процессы пробития многослойных и разнесенных преград высокоскоростными стержневыми элементами. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в физико-механические характеристики тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным. Эффективность разнесенных и слоисто-разнесенных преград, широко используемых в настоящее время в качестве защитных устройств, связана помимо гидродинамического и прочностного сопротивления прониканию также с потерей устойчивости, пластическими деформациями и разрушением стержней. Совокупность указанных процессов приводит к появлению углов нутации, отклонению вектора скорости и траектории остатка стержня и его фрагментов, а в конечном счете к уменьшению глубины проникания в слоисто-разнесенную конструкцию по сравнению с недеформируемым стержнем. В расчетах также моделируются осколочные поля и учитывается взаимодействие осколков между собой и с элементами многослойной преграды. Полученные результаты позволяют оптимизировать защиту объектов по массово-геометрическим параметрам. Важным применением предложенного подхода является исследование деформирования, разрушения и способов защиты трубопроводов от взрывного и ударного воздействия.

Ключевые слова:

Численное моделирование, эксперимент, высокоскоростные ударники, вероятность, фрагментация, космический мусор, трубопроводы, защита.

Проблема взаимодействия конструкций с высокоскоростными ударниками приобретает в настоящее время особое значение в связи с увеличивающейся скоростью соударения, что повышает вероятность пробития, разрушения и нарушения нормального функционирования защищаемых объектов. Задачи деформирования, разрушения и защиты трубопроводов являются важным классом подобных объектов, которым уделяется большое внимание исследователей [1, 2]. Эти конструкции широко применяются как в земных, так и космических условиях. Особенно остро в последнее время встала проблема надежной защиты пилотируемых и автоматических аппаратов для исследования околоземного и дальнего космического пространства в связи с увеличивающейся продолжительностью полетов указанных объектов, что повышает вероятность столкновения последних с техногенными осколками, образовавшимися в результате разрушения орбитальных конструкций. Эффективность разнесенных и слоисто-разнесенных преград, широко используемых в настоящее время в качестве защитных устройств, связана помимо гидродинамического и прочностного сопротивления прониканию также с потерей устойчивости, пластическими деформациями и разрушени-

ем стержней. Совокупность указанных процессов приводит к появлению углов нутации, отклонению вектора скорости и траектории остатка стержня и его фрагментов, а в конечном счете к уменьшению глубины проникания в слоисто-разнесенную конструкцию по сравнению с недеформируемым стержнем. Таким образом, оценкой сверху глубины проникания является вариант, когда стержень проникает без потери устойчивости и дробления на фрагменты, а только испытывает эрозию головной части. Получение таких верхних оценок необходимо для построения инженерных методик определения глубины проникания. В данной работе рассмотрены максимальные значения глубины проникания из экспериментальной базы данных, т. е. та часть экспериментов, где разрушение стержня менее всего влияло на конечный результат. В расчетах рассмотрены условия нагружения, где эрозия стержня приводит к постепенному уменьшению длины остатка стержня по мере его внедрения в слоисто-разнесенную либо разнесенную конструкцию.

Пробитие по нормали к поверхности слоистых преград рассматривалось в [3, 4]. Между слоями из металлических пластин помещался слой керамики. В [5] на основе модели расширения пластично-

го отверстия сравниваются две модели пробития пластичной металлической пластины жестким остроконечным ударником. Экспериментально-теоретическое исследование взаимодействия ударников с двумя различными формами носовой части с алюминиевой однослойной пластиной проведено в [6]. Влияние формы ударника и угла соударения на баллистический предел и механизм разрушения толстых однослойных стальных пластин исследовано в работе [7]. В [8] с использованием аналитического метода показано, что слоистость не улучшает баллистические свойства пластичных пластин, пробиваемых скоростными остроносими ударниками. Простая модель проникания длинного стержня рассмотрена в [9]. Модель, базирующаяся на режиме установившейся пенетрации, предсказывает глубину кратера от стержня, проникающего в полубесконечную преграду. В модели учитывались прочностные свойства и феномен эрозии соударяющихся материалов. Были проведены сравнения с имеющимся экспериментом. В работе [10] экспериментально, с использованием аналитического и численного моделирования, было проведено изучение баллистического сопротивления алюминиевых пластин из сплава 6061-T6 подвергнутых нормальному удару пуля небольшого калибра и при стандартных скоростях. Низкоскоростное (20...300 м/с) пробитие пластин из алюминиевых сплавов рассмотрено в [11]. Основное внимание уделено цилиндрическим ударникам с различными формами носика. С результатами баллистического эксперимента [12, 13] сравнивались данные компьютерного моделирования. Сравнение проводилось по следующим параметрам: остаточной скорости и остаточной длине стержня после пробития первой преграды. Метание стержней в разделяющемся ведущем устройстве проводили на двухступенчатой легкогазовой установке ГУ-23. Регистрация параметров остатка стержня за преградой производилась методом импульсного рентгенографирования двумя ортогонально расположенными рентгеноимпульсными аппаратами.

Как видно из приведенного анализа имеющихся работ, разработка трехмерного численного метода, учитывающего фрагментацию соударяющихся тел, является весьма актуальной задачей. В основном авторы приведенных работ рассматривали однослойные пластины и удар по нормали. Следует отметить, что для практических задач больший интерес представляют разнесенные преграды и удар под углом. Для численного решения этих задач необходим надежный и достаточно универсальный метод, позволяющий адекватно воспроизводить процессы разрушения и фрагментации, протекающие в твердых телах при высокоскоростном взаимодействии.

Учет фрагментации материала твердых тел при интенсивных динамических нагружениях позволяет использовать Лагранжев подход к задачам высокоскоростного удара для достаточно широкого ди-

апазона скоростей взаимодействия. Этот подход особенно удобен при рассмотрении многоконтактных взаимодействий сталкивающихся тел, особенно при решении трехмерных задач удара. Начальная гетерогенность структуры реальных материалов, влияющая на характер распределения физико-механических характеристик материала по объему рассматриваемого тела, является важным фактором, определяющим характер разрушения. Одним из способов учета этого факта является введение в уравнения механики деформируемого твердого тела случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения, то есть моделирование, таким образом, начальных структурных особенностей материала, а именно наличие пор, включений, дислокаций и т. д.

В представленной работе в трехмерной Лагранжевой постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия слоистых и разнесенных преград с длинными стержнями (отношение длины стержня к его диаметру равно 10). Задачи решаются для широкого диапазона скоростей с учетом дробления материала взаимодействующих тел, причем соударение происходит не только по нормали, но и под углом к поверхности преграды.

Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии, и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса при условии текучести Мизеса [14–16]. Уравнение состояния берется в форме Тета и Ми–Грюнайзена [14]. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, апробированными в работе [17].

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [15, 16] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [18, 19] для расчета контактных взаимодействий. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки.

В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [14, 20].

Начальные неоднородности структуры моделировались распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим,

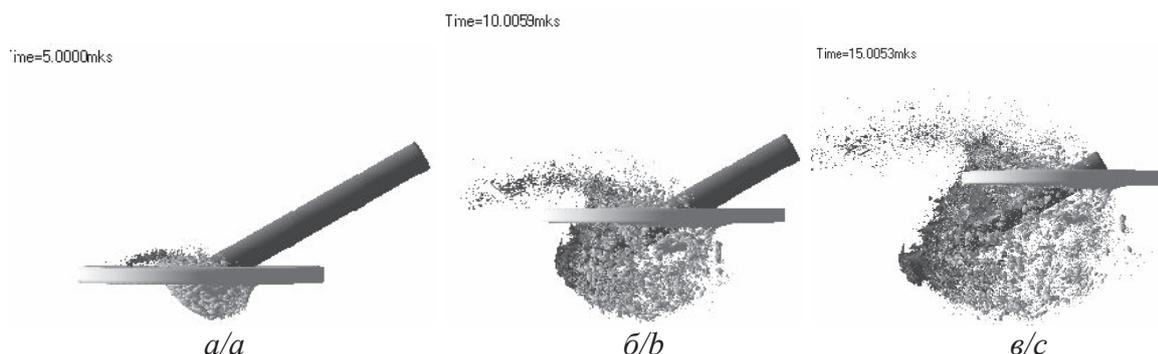


Рис. 1. Удар под углом 60 градусов (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см, $v=2764$ м/с; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,2 см): а) 5; б) 10; в) 15 мкс

Fig. 1. Impact at an angle of 60 degrees (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm, $v=2764$ m/sec; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,2 cm): a) 5; b) 10; c) 15 mks

равным табличному значению, и варьруемой дисперсией.

Используемые в современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают вероятностного фактора в задаче дробления твердых тел, что может существенно исказить реальную картину ударного и взрывного разрушения рассматриваемых объектов. Последнее особенно проявляется при решении осесимметричных задач, где все точки по окружной координате рассчитываемого элемента исходно равноправны в силу используемых при численном моделировании стандартных уравнений механики сплошных сред. На практике, однако, имеется широкий ряд задач, где фрагментация является преимущественно вероятностным процессом, например, взрывное разрушение осесимметричных оболочек, где характер дробления заранее неизвестен, пробитие и разрушение тонких преград ударником по нормали к поверхности, так называемое «лепесткование», и т. д. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в физико-механические характеристики тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным, используемым в данной работе. Наиболее полно идеология и методология вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в [21].

Процесс соударения под углом цилиндрического ударника с плоским торцом с тонкой стальной пластиной показан на рис. 1.

На рис. 1 приведены отдельные моменты взаимодействия ($t=5$; $t=10$; $t=15$ мкс) ударника с преградой под углом 60 градусов от нормали к ее поверхности, полученные при численном моделировании процесса соударения. Картина соударения хорошо коррелирует с экспериментальными данными, приведенными на рис. 2. Наблюдается выброс материала с лицевой поверхности преграды и формирование своеобразного осколочного «пузыря» тыльной поверх-

ности. Часть материала с переднего торца ударника эродирует и вносит свой вклад в формирование осколочного поля системы «ударник–преграда».

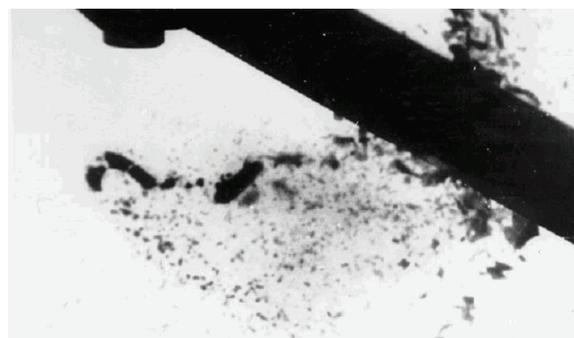


Рис. 2. Рентгенограмма пробития стального экрана толщиной 6 мм ударником из вольфрамового сплава диаметром 0,4 см и удлинением 10 см под углом 60 градусов при скорости 2764 м/с

Fig. 2. X-ray pattern of 6 mm steel screen breaking by tungsten alloy impactor with the diameter 0,4 cm and an elongation of 10 cm at an angle of 60 degrees at the rate of 2764 m/sec



Рис. 3. Удар под углом 60 градусов (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,2 см, $v=2764$ м/с)

Fig. 3. Impact at an angle of 60 degrees (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,2 cm, $v=2764$ m/sec)

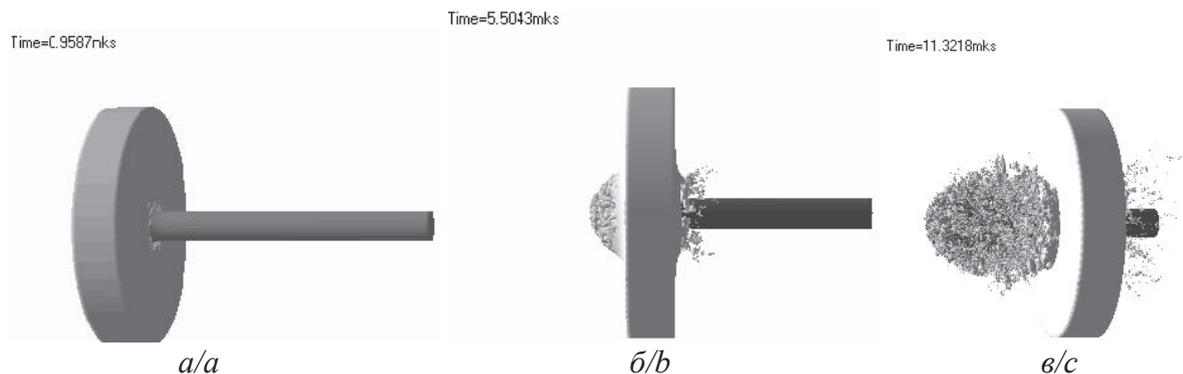


Рис. 4. Удар по нормали (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,2 см, $v=2732$ м/с): а) 1; б) 5,5; в) 11,3 мкс

Fig. 4. Normal impact (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,2 cm, $v=2732$ m/sec): a) 1; b) 5,5; c) 11,3 mks

Результаты эксперимента (рис. 2) качественно подтверждают картину взаимодействия ударника с преградой, приведенную на рис. 3. Количественная оценка расчетных и экспериментальных данных по остаточной длине стержня после пробития им преграды в рассмотренном случае была затруднена в силу дробления ударника в эксперименте на ряд кусков. Это произошло из-за наличия угла нутации, что не было заложено в проведенный расчет.

На рис. 4 приведены характерные особенности процесса соударения по нормали стержня со стальной пластиной – преградой. Здесь наблюдается выброс материала с лицевой поверхности и формирование осколочного потока за тыльной стороной пластины. Формирование потока фрагментов при осесимметричной постановке задачи об ударе по нормали возможно только при использовании трехмерного подхода и учете вероятностного характера дробления материала преграды и ударника.

Результаты численного моделирования процесса соударения стержня и преграды по нормали к последней для ряда моментов времени ($t=1$; $t=5,5$; $t=11,3$ мкс) приведены на рис. 4, 6. Эрозия материала с переднего торца ударника отчетливо видна на рис. 6.

На рис. 6 представлено двумерное сечение трехмерной картины взаимодействия стержня и преграды (рис. 4). Сравнение экспериментальных данных (рис. 5) с численными результатами (рис. 4, 6) позволяет сделать вывод о хорошем качественном совпадении полученных результатов, а также отображении в расчете характерных особенностей процесса осколкообразования из материалов стержня и преграды. Количественная оценка расчетных и экспериментальных данных по остаточной длине стержня после пробития им преграды в рассмотренном случае дала разницу порядка 2 % и по остаточной скорости – 6 %.

На рис. 7 показаны осколочные спектры для преграды и ударника. Картина разрушения преград и ударника характеризуется наличием оскол-

ков различных размеров с преобладанием самой мелкой фракции, что характерно для высокоскоростных соударений [22].

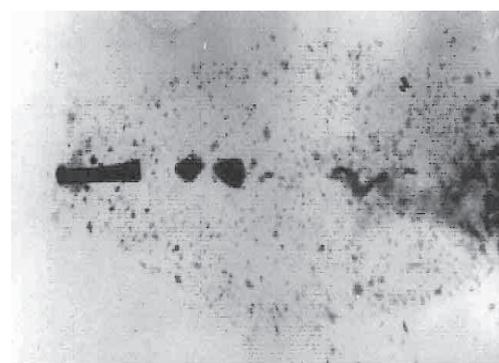


Рис. 5. Рентгенограмма пробития стальной пластины толщиной 6 мм ударником из вольфрамового сплава диаметром 4 мм и удлинением 10 при скорости 2732 м/с

Fig. 5. X-ray pattern of 6 mm steel plate breaking by tungsten alloy impactor with the diameter 4 mm and elongation 10 at the rate of 2732 m/sec



Рис. 6. Удар по нормали (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,6 см; $v=2732$ м/с)

Fig. 6. Normal impact (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,6 cm, $v=2732$ m/sec)

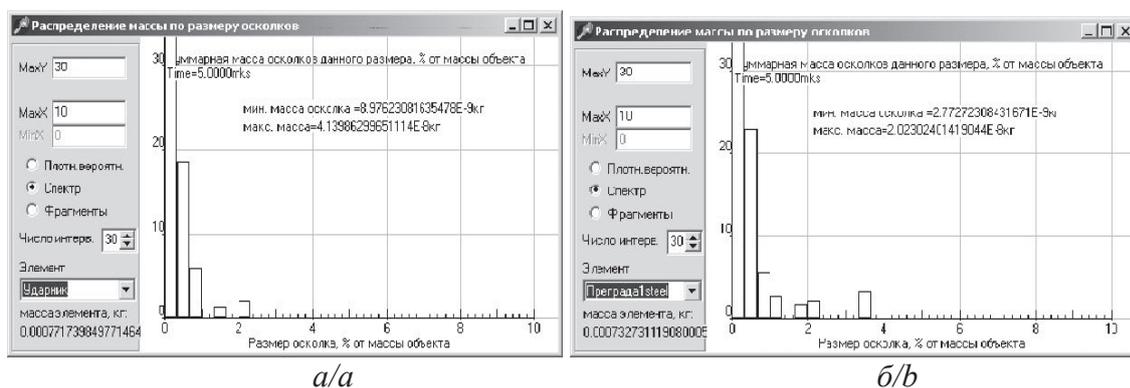


Рис. 7. Осколочный спектр: а) ударник; б) преграда

Fig. 7. Fission spectrum: a) impactor; b) barrier



Рис. 8. Взаимодействие стержня с разнесенной преградой из трех пластин (ударник: радиус 0,5 см, длина 8 см; преграда: сталь Al-Ti, радиус 3 см, толщина 0,5 см, расстояние между пластинами 1 см, $v=5000$ м/с): а) 4; б) 5,6 мкс

Fig. 8. Interaction of a rod with a spaced barrier of three plates (impactor: radius is 0,5 cm, length is 8 cm; barrier: Al-Ti steel, radius is 3 cm, thickness is 0,5 cm, distance between plates is 1 cm, $v=5000$ m/sec)

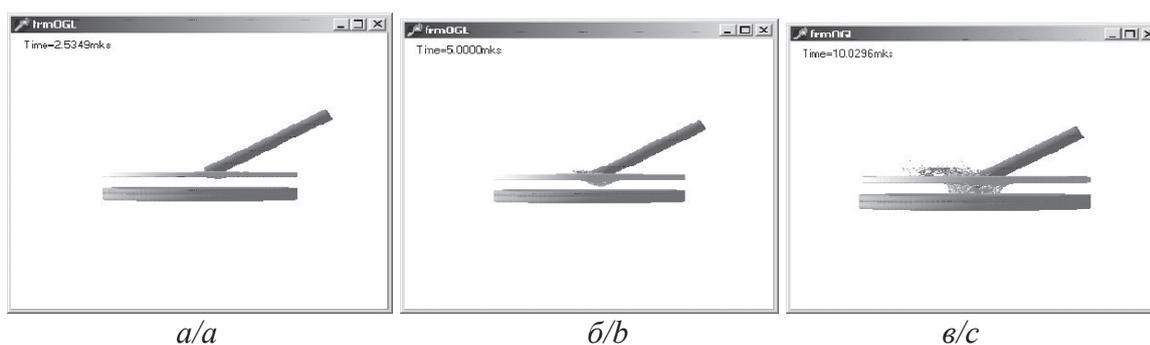


Рис. 9. Взаимодействие стержня с разнесено-слоистой преградой (ударник: радиус 0,3 см, длина 6 см; преграда: сталь Al+Ti, радиус 3 см, толщина 0,3 см, расстояние между пластинами 0,5 см, $v=2600$ м/с, угол соударения 60 град): а) 2,5 мкс, б) 5 мкс, в) 10 мкс

Fig. 9. Interaction of a rod with a layered-spaced barrier of three plates (impactor: radius is 0,3 cm, length is 6 cm; barrier: Al-Ti steel, radius is 3 cm, thickness is 0,3 cm, distance between plates is 0,5 cm, $v=2600$ m/sec, impact angle is 60 degrees)

Возможности предложенной методики иллюстрируют приведенные расчеты взаимодействия стержня с разнесенной преградой, состоящей из трех пластин (рис. 8), и взаимодействия стержня с разнесено-слоистой преградой (рис. 9). Пробоитие разнесенной преграды сопровождается формированием выброса материала с лицевой стороны пер-

вой пластины и потока осколков с тыльной стороны. Следующая пластина подвергается воздействию сохранившейся части ударника и потока фрагментов от предыдущей пластины и разрушенной части ударника (рис. 8). Происходит торможение остатка ударника, и при соответствующем подборе пластин, расстояний между ними и началь-

ной скорости ударника возможно пробитие либо отсутствие перфорации системы пластин. Качественно процесс пробития системы разнесенных пластин во многом похож на пробитие одной пластины, но количественные характеристики существенно отличаются. Первый этап соударения стержня со слоисто-разнесенной пластиной хорошо коррелирует с результатами, приведенными на рис. 9. Дальнейшее взаимодействие со слоистой преградой определяется физико-механическими свойствами слоев, что приводит к изменению времени, необходимому для их пробития.

Выводы

Вероятностный подход и предложенная в работе численная методика в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке позволяют с достаточно высокой точностью воспроиз-

водить процессы пробития многослойных и разнесенных преград высокоскоростными стержневыми элементами. В расчетах полностью моделируются осколочные поля и учитывается взаимодействие осколков между собой и с элементами многослойной преграды, что чрезвычайно важно при расчетах по защите космических аппаратов, так как формирующиеся при ударе потоки высокоскоростных частиц могут пробить основной корпус аппарата и повредить оборудование. Поэтому необходимо оценить кинетическую энергию осколков и рассчитать процесс соударения их с основным корпусом. Предложенный подход позволяет рассчитать весь процесс взаимодействия ударника и преград с учетом формирования осколочных потоков и соударения последних с защищаемым объектом.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 13-08-00296-а и 12-08-00641-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones N., Birch R.S. Low-velocity impact of pressurised pipelines // *International Journal of Impact Engineering*. – 2010. – V. 37. – № 2. – P. 207–219.
2. Full-scale impact tests on pipelines / A. Palmer, M. Touhey, S. Holder, M. Anderson, S. Booth // *International Journal of Impact Engineering*. – 2006. – V. 32. – № 8. – P. 1267–1283.
3. Герасимов А.В., Пашков С.В. Численное моделирование пробития слоистых преград // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 49–61.
4. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Numerical simulation of the perforation of layered barriers // *Composites: Mechanics, Computations, and Applications. An International Journal*. – 2013. – V. 4. – № 2. – P. 97–111.
5. Chen X.W., Huang X.L., Liang G.J. Comparative analysis of perforation models of metallic plates by rigid sharp-nosed projectiles // *International Journal of Impact Engineering*. – 2011. – V. 38. – P. 613–621.
6. Experimental and numerical studies of double-nosed projectile impact on aluminum plates / M.A. Iqbal, S.H. Khan, R. Ansari, N.K. Gupta // *International Journal of Impact Engineering*. – 2013. – V. 54. – P. 232–245.
7. Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates / M.A. Iqbal, A. Diwakar, A. Rajput, N.K. Gupta // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2012. – V. 62. – P. 40–53.
8. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. About effect of layering on ballistic properties of metal shields against sharp-nosed rigid projectiles // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2013. – V. 102. – P. 358–361.
9. Nezamabadi A.R., Vahedi K., Zohoor H. Development of a penetration model for an erosive long rod considering strength effects of colliding materials // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. P. C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2011. – V. 225. – P. 965–973.
10. Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets / A. Manes, F. Serpellini, M. Pagani, M. Saponara, M. Giglio // *International Journal of Impact Engineering*. – 2014. – V. 69. – P. 39–54.
11. Jones N., Jeom K.P. Impact perforation of aluminium alloy plates // *International Journal of Impact Engineering*. – 2012. – V. 48. – P. 46–53.
12. Толкачев В.Ф. Разрушение комбинированных преград высокоскоростными стержневыми ударниками // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Матер. V Всесоюзной науч. конф.* – Томск, 2006. – С. 312–313.
13. Экспериментальное и компьютерное моделирование бронепробиваемости компактными и удлиненными элементами / А.В. Герасимов, А.А. Коняев, С.Н. Кульков, В.Ф. Толкачев, Ю.Ф. Христенко // *Вестник Академии военных наук*. – 2008. – № 3. – С. 149–154.
14. Физика взрыва / под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
15. Уилкинс М.Л. Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – 263 с.
16. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin; Heidelberg; New-York: Springer, 1999. – 246 p.
17. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // *J. Appl. Phys.* – 1980. – V. 51. – № 3. – P. 1496–1504.
18. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // *Int. J. Numer. Methods Engng.* – 1979. – V. 14. – № 12. – P. 1865–1871.
19. Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // *Trans. ASME. J. of Appl. Mech.* – 1981. – V. 48. – № 1. – P. 30–34.
20. Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями / К.Н. Крейнхаген, М.Х. Вагнер, Дж. Пьечочки, Р.Л. Бьорк // *Ракетная техника и космонавтика*. – 1970. – Т. 8. – № 12. – С. 42–47.
21. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 572 с.
22. Высокоскоростные ударные явления / под ред. Р. Кинслоу. – М.: Мир, 1973. – 536 с.

Поступила 20.04.2014 г.

UDC 539.3

NUMERICAL SIMULATION OF LONG RODS COLLISION WITH LAYERED-SPACED BARRIERS

Alexander V. Gerasimov,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Relevance of the research is caused by the need to protect space technology against man-made debris.

The main aim of the study is to justify the application of three-dimensional numerical method based on the Lagrangian approach in describing the behavior of a continuum and a probabilistic approach in solid body fragmentation under impact loading relative to the problem of protecting space and ground facilities by combined barriers when interacting with elongated strikers-rods.

The methods used in the study: A computational experiment involving experimental data to verify the numerical results.

The results: The probabilistic approach and the proposed numerical technique allow, from physical point of view, reproducing with sufficient accuracy the processes of penetration and multilayer barriers spaced by high-speed core elements in more complete three-dimensional formulation. The introduction of random distribution of strength behavior initial displacement from nominal value into a body physical and mechanical characteristics results in destruction probabilistic nature in this case. This corresponds to the experimental data. The efficiency of spaced and layered-spaced barriers, currently widely used as protecting devices, is related to instability, plastic deformation and rod destruction besides hydrodynamic and strength resistance. The totality of the processes results in nutation angles occurrence, deviation of velocity vector and rod residue and fragments as well as in decrease in depth of penetration into layered-spaced construction in comparison with an inflexible rod. In calculations the author simulates shrapnel fields and takes into account fragments interaction and their interaction with the elements of a multi-layer barrier. The results obtained allow optimizing the protection of objects of mass geometrical parameters. An important application of the proposed approach is to study the deformation, fracture and ways to protect pipelines from the explosion and impact.

Key words:

Numerical modeling, experiment, high-speed impactor, probability, fragmentation, space debris, pipeline, protection.

The research was partially supported by RFBR grants 13–08–00296-a and 12–08–00641-a.

REFERENCE

- Jones N., Birch R.S. Low-velocity impact of pressurised pipelines. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 207–219.
- Palmer A., Touhey M., Holder S., Anderson M., Booth S. Full-scale impact tests on pipelines. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, no. 8, pp. 1267–1283.
- Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Chislennoe modelirovanie probitiya sloistykh pregrad [Numerical modeling of the layered barriers penetration]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 49–61.
- Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Numerical simulation of the perforation of layered barriers. *Composites: Mechanics, Computations, and Applications. An International Journal*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 97–111.
- Chen X.W., Huang X.L., Liang G.J. Comparative analysis of perforation models of metallic plates by rigid sharp-nosed projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, pp. 613–621.
- Iqbal M.A., Khan S.H., Ansari R., Gupta N.K. Experimental and numerical studies of double-nosed projectile impact on aluminum plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 54, pp. 232–245.
- Iqbal M.A., Diwakar A., Rajput A., Gupta N.K. Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012, vol. 62, pp. 40–53.
- Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. About effect of layering on ballistic properties of metal shields against sharp-nosed rigid projectiles. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, vol. 102, pp. 358–361.
- Nezamabadi A.R., Vahedi K., Zohoor H. Development of a penetration model for an erosive long rod considering strength effects of colliding materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2011, vol. 225, pp. 965–973.
- Manes A., Serpellini F., Pagani M., Saponara M., Giglio M. Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 39–54.
- Jones N., Jeom K.P. Impact perforation of aluminium alloy plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, vol. 48, pp. 46–53.
- Tolkachev V.F. Razrushenie kombinirovannykh pregrad vysokoskorostnymi sterzhnevymi udarnikami [Destruction of combine barriers by high-speed rod impactors]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki: Materialy V Vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii* [Proc. V All-Union scientific conference. Fundamental and applied problems of modern mechanics]. Tomsk, Tomsk University Press, 2006. pp. 312–313.
- Gerasimov A.V., Konyaev A.A., Kulkov S.N., Tolkachev V.F., Khristenko Yu.F. Eksperimentalnoe i kompyuternoe modelirovanie broneprobivaemosti kompaktnymi i udlinennymi elementami [Experimental and computer simulation of armor penetration by compact and long elements]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2008, no. 3 (24), pp. 149–154.
- Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Ed. by K.P. Stanyukovich. Moscow, Nauka Publ., 1975. 704 p.
- Wilkins M.L. Calculation of elastic-plastic flow. *Methods in Computational Physics*. Ed. B. Adler. NY, Academic Press, 1964. Vol. 3, 263 p.
- Wilkins M.L. *Computer simulation of dynamic phenomena*. Berlin; Heidelberg; New-York, Springer, 1999. 246 p.
- Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate. *J. Appl. Phys.*, 1980, vol. 51, no. 3, pp. 1496–1504.
- Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads. *Int. J. Numer. Methods Engng.*, 1979, vol. 14, no. 12, pp. 1865–1871.
- Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions. *Trans. ASME. J. of Appl. Mech.*, 1981, vol. 48, no. 1, pp. 30–34.
- Kreinshagen K.N., Vagner M.H., Pechotski J., Bork R.L. A determination of a ballistic limit at impact with structural targets. *AAAJ*, 1970, vol. 8, pp. 42–47.
- Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tel* [Theoretical and experimental researches of high-speed interaction of bodies]. Ed. by A.V. Gerasimov. Tomsk, Tomsk University Press, 2007. 572 p.
- High-Velocity Impact Phenomena*. Ed. by R. Kinslow. New York; London, Academic Press, 1970. 536 p.

Received: 20 April 2014.

УДК 531.66;532.696

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕМПЕРАТУРНОГО УСЛОВИЯ АДГЕЗИИ В МОДЕЛИ «КАПЛЯ РАСПЛАВА – ПОДЛОЖКА»

Колесникова Елена Александровна,

аспирант каф. теплогазоснабжения Инженерно-экологического факультета
Томского государственного архитектурно-строительного университета,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: alko.gm@gmail.com

Актуальность работы обусловлена совершенствованием технологии нанесения термических покрытий и методов определения оптимальных характеристик технологического процесса.

Цель работы: определение температурных полей и температурных условий адгезии в модели «капля расплава – подложка» при образовании между ними металлической связи.

Методы исследования: построение оригинальной математической модели температурных полей и температурного условия, соответствующих достижению адгезии в системе «капля-подложка»; экспериментальная проверка результатов, полученных по предложенной модели.

Результаты. Представлен метод определения температурных полей в системе «капля-подложка», основанный на выравнивании температур малых соседних кубических объемов. Метод основан на положении, что нестационарный процесс передачи тепла приближается к стационарному процессу при уменьшении временных и размерных интервалов. В предложенном методе не используются дифференциальные уравнения. Расчет нестационарного температурного поля проводится на основе уравнений передачи тепла для стационарного режима. Для начальной контактной температуры при известных для неё величинах теплопроводности, теплоемкости и плотности металлов капли и подложки получено расчетное температурное условие, определяющее наличие или отсутствие адгезии капли. Определено, что условием наличия адгезии является плавление материала подложки под каплей. Плавление части поверхности под каплей соответствует неполной адгезии, плавление всей поверхности подложки под ней соответствует максимальной адгезии. Температурное условие адгезии справедливо при отсутствии образования интерметаллида между материалом капли и подложки. Адекватность температурного условия адгезии подтверждается наличием и отсутствием адгезии при осаждении на оловянную и свинцовую подложки каплю олова и свинца.

Ключевые слова:

Адгезия, капля, расплав, подложка, контактная температура, температура плавления, температурное поле.

Введение

Технология высокотемпературного нанесения порошковых покрытий широко применяется в промышленном производстве [1–4]. Совершенствование применяемых технологий и разработка эффективных приемов нанесения порошковых покрытий требуют поддержания оптимальных условий данного процесса. Также важной задачей является определение и обеспечение требуемых условий достижения качественной адгезии покрытия [1, 5–15], а одним из параметров процесса – глубина плавления подложки под покрытием. Чрезмерный перегрев капли и подложки может являться причиной чрезмерной глубины плавления поверхностного слоя подложки и нежелательного изменения структуры материалов.

Каждая закрепившаяся на поверхности капля является структурной единицей покрытия. Если закрепившаяся капля соответствует технологическому требованию, то можно ожидать его выполнения для характеристики всего покрытия. По этой причине в последние десятилетия теоретическим и экспериментальным исследованиям этой темы посвящено большое количество работ [1–21]. В связи со сложностью и высокой стоимостью экспериментальных исследований значительное внимание уделяется численному моделированию взаимодействия в системе «капля-подложка» [1, 4]. Для описания капли, растекающейся по поверхности, предложены физические и математические модели ее деформации и затвердевания [5–21]. Выявлены и проанализированы основные факторы, влия-

ющие на адгезию капли к подложке. Однако не все связи между этими факторами имеют однозначные объяснения [5–15]. В результате процесс получения адгезии в системе «капля-подложка», несмотря на серьезное внимание к нему, затруднительно включать в математические модели.

За последние два десятилетия в численном моделировании процесса взаимодействия капли с подложкой достигнуты значительные успехи [1, 16–21], требующие, однако, существенных временных и ресурсных затрат [1]. Несмотря на это, актуальным остается необходимость определения параметров термического нанесения покрытий.

Постановка задачи

Целью данной работы является описание методики определения температурных полей для системы «капля-подложка» методом выравнивания малых соседних кубических объемов и определение температурного условия адгезии в системе «капля-подложка».

Методика определения нестационарного температурного поля методом выравнивания температур малых соседних кубических объемов

Основанием метода служит положение о том, что передача тепла приближена к стационарному процессу, когда расчет проводится для малых временных и размерных интервалов [22]. Чем меньше рассматриваемые интервалы времени и пространства, для которых рассчитывается тепловой про-

процесс, тем больше нестационарный процесс теплопередачи приближается к стационарному процессу.

При определении нестационарного теплового поля проводится разбивка капли и подложки на малые кубические объемы. Выравнивание температур в двух малых смежных объемах тем точнее соответствует реальному процессу теплопроводности, чем меньше рассматриваемые кубические объемы. Процесс передачи тепла между парами смежных объемов рассчитывается по уравнению Фурье, соответствующему стационарному процессу теплопередачи, а также закону сохранения энергии [22].

$$\Delta Q_1 = \frac{\lambda(T_2 - T_1)\Delta t S}{\Delta l},$$

$$\Delta Q_2 = c\rho S\Delta l(T_2 - T_1),$$

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2,$$

где ΔQ_1 – количество теплоты, которое за время Δt проходит через приповерхностный слой материала Δl при неизменных температурах на границах этого участка T_1 и T_2 ; λ , ρ , c – теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость материала соответственно; ΔQ_2 – количество теплоты, которое проходит через площадь поверхности S .

Для определения температурного поля при постоянных величинах теплопроводности λ и теплоемкости c подложка и капля разбиваются на одинаковые объемы с длиной ребра куба Δl . Выров-

ненная температура смежных кубических объемов T_3 в данном случае определяется выражением:

$$T_3 = \frac{T_2 + T_1}{2}.$$

Процесс передачи тепла при стационарном режиме между смежными кубическими объемами изотропной однородной среды схематически показан на рис. 1. За время $\Delta t = (c\rho\Delta l^2)/\lambda$ тепло, равное $\Delta Q = c\rho\Delta l^3(T_2 - T_1)$, переходит из всего первого объема во второй.

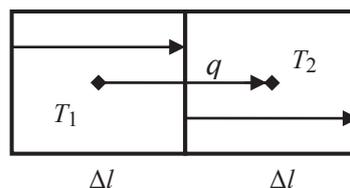


Рис. 1. Передача тепла между смежными кубическими объемами изотропной однородной среды в стационарном режиме

Fig. 1. Heat transfer between adjacent cubic volumes of isotropic homogeneous medium in steady-state conditions

Рассмотрим передачу тепла в столбике, составленном из малых кубических объемов. На рис. 2 представлены графики изменения температур рассматриваемых малых смежных кубических объемов в разные интервалы времени.

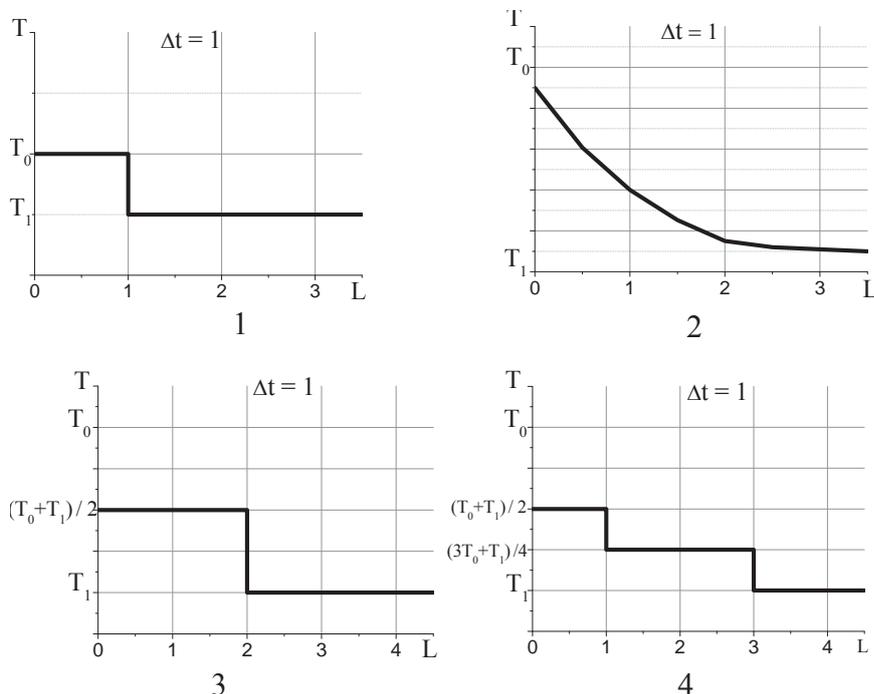


Рис. 2. Графики изменения температур T малых смежных объемов длиной $l=1$ в интервалы времени $\Delta t=0$ и $\Delta t=1$. 1 – температуры смежных объемов в начальный момент времени; 2 – фактические температуры смежных объемов в момент времени $\Delta t=1$; 3 – промежуточная температура смежных объемов в момент времени $\Delta t=1$, рассчитанная по предложенному методу выравнивания температур; 4 – конечная температура смежных объемов в момент времени $\Delta t=1$, рассчитанная по предложенному методу выравнивания температур.

Fig. 2. Temperature T curves of small adjacent volumes with the length of $l=1$ in time intervals $\Delta t=0$ and $\Delta t=1$. 1 are the temperatures of adjacent volumes at the initial time; 2 are actual temperatures of adjacent volumes at $\Delta t=1$; 3 is the intermediate temperature of adjacent volumes at $\Delta t=1$, calculated by the proposed equalization temperature technique; 4 is the final temperature of adjacent volumes at $\Delta t=1$, calculated by the proposed equalization temperature technique.

На рис. 2 (2) показано распределение температур, отражающее реальный процесс передачи тепла. На рис. 2 (3, 4) представлен процесс передачи тепла по модели, используемой в предложенном методе расчета температурного поля. Из рисунков видно, что в реальном процессе за время Δt тепло из первого объема поступает не только в смежный объем, но и в следующие за ним объемы. В предложенной модели тепло за время Δt поступает только в смежный объем, не выходя за его пределы. При этом разность температур между вторым и третьим объемами получается больше, чем в реальном процессе. Следовательно, согласно уравнению передачи тепла в стационарном режиме, скорость передачи тепла в модели из второго объема в третий больше этой скорости в реальном процессе теплопередачи. Таким образом, отставание передачи тепла по расстоянию в модели компенсируется увеличением скорости передачи тепла за счет превышения температурного перепада над реальной разницей температур.

При плавлении и затвердевании материала используется уравнение теплоты плавления:

$$\Delta Q = q \Delta l s \rho,$$

где ΔQ – количество теплоты, получаемое веществом при плавлении (выделившееся при кристаллизации); q – удельная теплота плавления.

За единичный момент времени в единичный объем поступает определенное количество теплоты. Приращение температуры соответствует поступившему в единичный объем количеству теплоты. Величина приращения температуры, эквивалентная теплоте плавления единичного объема, определяется уравнением:

$$\Delta T = q / c,$$

где q – теплота плавления; c – удельная теплоемкость при температуре плавления.

Единичный кубический объем является расплавленным, когда количество поглощенного тепла достигнет величины ΔT . Аналогичным образом рассчитывается процесс кристаллизации единичных объемов в единичные интервалы времени.

Для случая с переменными величинами λ и c тепло, распространяемое за равные промежутки времени Δt , преодолевает различные расстояния Δl . По этой причине для использования предложенного метода при переменных теплоемкости и теплопроводности необходимо из равных малых кубических объемов с длиной ребра Δl сформировать столбики из кубических объемов длиной $\delta l n_i$, которые будут соответствовать распространению тепла за один расчетный интервал времени $\delta l n_i$. Схематическое изображение объединения кубических объемов в столбики с одинаковой теплопроводностью показано на рис. 3.

Точность расчета тем выше, чем больше начальная разбивка капли и подложки по толщине (т. е. меньше исходный отрезок $\delta l n_{\min}$).

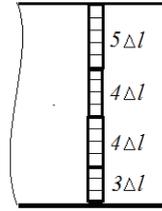


Рис. 3. Схематическое изображение объединения кубиков в столбики с одинаковой теплопроводностью

Fig. 3. Diagram of blocks combination into columns with equal thermal conductivity

Количество кубических объемов в группе определяется величиной теплопроводности при данном интервале температур. Оптимальное количество кубических объемов в столбике n_{\min} определяется минимальной величиной теплопроводности λ_{\min} и заданной погрешностью, вносимой изменением теплопроводности. Для каждого температурного диапазона относительно выбранного числа n_{\min} рассчитывается число кубов n_i в столбике в соответствии с λ_i . Число кубических объемов n_i в столбике определяется по формуле:

$$n_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\min}} n_{\min},$$

где n_{\min} , λ_{\min} – минимальное количество кубических объемов Δl в группе и соответствующая этой группе минимальная теплопроводность; n_i , λ_i – количество кубических объемов с ребром Δl и теплопроводность в i -м столбике; i – номер температурного диапазона (столбик кубических объемов).

Выравниваемая температура двух смежных столбиков в случае переменной теплоемкости и теплопроводности определяется выражением:

$$T_{n(i),n(i+1)} = \frac{\left(\sum_1^{n(i)} c_{n(i)} T_{n(i)} + \sum_1^{n(i+1)} c_{n(i+1)} T_{n(i+1)} \right)}{\left(\sum_1^{n(i)} c_{n(i)} + \sum_1^{n(i+1)} c_{n(i+1)} \right)},$$

где $c_{n(i)}$, $c_{n(i+1)}$ – теплоемкость каждого кубического объема в i -м и $(i+1)$ столбике; $T_{n(i)}$, $T_{n(i+1)}$ – температура куба в i -м и $(i+1)$ столбиках; n_i , n_{i+1} – количество кубов в i -м и столбиках.

Достоверность предложенного метода подтверждена результатами сравнения расчета тестовых задач по определению температурного поля в бесконечной пластине, бесконечном цилиндре и шаре [22, 23], а также соответствием расчета изменения температуры стальной пластины во времени результатам эксперимента [24].

Температурное условие адгезии капли на подложке

Адгезия наносимых на поверхность частиц является важным процессом в технологии нанесения порошковых покрытий на различные конструкционные материалы. Существует несколько теорий: адсорбционная, механическая, электрическая, электронная, диффузионная и химическая, описывающих явление адгезии с различных сто-

рон [1, 3, 5, 25]. Каждая из них находит подтверждение в результатах численных и экспериментальных исследований.

Однако до настоящего времени эти теории не позволяют получить математическое выражение температурного условия адгезии, то есть рассчитать начальные температуры капли и подложки для конкретных случаев. В настоящей работе определяются температурные условия, необходимые для возникновения адгезионной связи капель расплава металла с поверхностью металлической подложки при условии отсутствия образования интерметаллидов. Так как связь между атомами в решетке интерметаллидов становится ионной, или ковалентной, то почти все интерметаллиды хрупки и их появление в упрочняющем или защитном покрытии нежелательно. По этой причине для защитных и упрочняющих покрытий используются покрытия, не образующие интерметаллидных соединений.

Известно, что при контакте капли металла с подложкой контактный слой подложки плавится с дальнейшей кристаллизацией смеси расплавов капли и подложки [1, 3, 5, 25]. При этом происходит взаимодействие материалов с образованием металлической связи, которая обеспечивает адгезию между двумя металлами. Время взаимодействия расплавленной капли с поверхностью до ее кристаллизации мало по сравнению со временем, необходимым для протекания диффузионного процесса, обеспечивающего адгезию. По этой причине вклад диффузионного процесса в адгезию при напылении частиц, размер которых обычно не превышает десятки микрон, пренебрежимо мал.

Температурное условие начала адгезии основано на требовании плавления граничного слоя подложки под каплей. Максимальная адгезия достигается при плавлении всей поверхности подложки под каплей. Плавление части поверхности под каплей соответствует неполной адгезии [23].

Основным параметром процесса, определяющим образование прочной металлической связи между осаждаемой частицей и подложкой, является температура в зоне контакта. Для определения температурного условия адгезии введем понятие критериальной контактной температуры. Значение критериальной контактной температуры T_k соответствует температуре контактного слоя, пока оно не превысит температуру плавления материала подложки T_m . Величина контактной температуры перестает соответствовать критериальной контактной температуре T_k после превышения ей температуры плавления подложки T_m . Выражение для критериальной контактной температуры T_k получено из теплового баланса между граничными слоями капли и подложки без учета плавления материала подложки

$$T_1 c_1 \rho_1 S l_1 + T_2 c_2 \rho_2 S l_2 = T_k (c_1 \rho_1 S l_1 + c_2 \rho_2 S l_2) \quad (1)$$

и стационарных уравнений теплопередачи

$$\begin{aligned} Q_1 &= (\lambda_1 (T_1 - T_2) S \Delta t) / l_1, \\ Q_2 &= (\lambda_2 (T_1 - T_2) S \Delta t) / l_2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$Q_1 = Q_2,$$

где S – площадь контакта; λ – теплопроводности; c – теплоемкости; ρ – плотности капли и подложки соответственно; l – толщины прилегающих к зоне контакта тонких слоев материала капли и подложки, соответствующие передаче тепла Q за время Δt . Здесь и далее индекс 1 относится к капле, а индекс 2 соответствует подложке.

Из (2) получаем соотношение

$$l_1 / l_2 = \lambda_1 / \lambda_2.$$

Тогда выражение для критериальной контактной температуры T_k имеет вид:

$$T_k = (n T_1 + T_2) / (n + 1), \quad (3)$$

где $n = \frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2}$ – безразмерный параметр.

Использование выражений (1), (2), описывающих стационарный процесс теплопередачи, для нестационарного процесса в начальный момент контакта капли и подложки допускается по причине того, что при малом временном интервале процесс передачи тепла в контактной зоне близок к стационарному процессу.

Разделив обе части уравнения (3) на температуру плавления материала подложки T_m , получаем выражение для определения температурных условий возникновения адгезии в безразмерном виде:

$$T_k / T_m = 1 / (n + 1) (n T_1 / T_m + T_2 / T_m), \quad (4)$$

где T_m – температура плавления подложки; T_k / T_m , T_1 / T_m , T_2 / T_m – критериальная контактная температура, температура расплавленной капли и температура подложки в безразмерном виде соответственно.

Для получения качественной адгезии величина T_k / T_m должна быть больше единицы. В этом случае расчетная контактная температура T_k превышает температуру плавления подложки, что соответствует началу ее плавления в области контакта. Таким образом, если значение T_k / T_m превышает 1, то наблюдается адгезия капли. Большее превышение единичного значения критерия соответствует большей глубине проплавления подложки. Значение $T_k / T_m \leq 1$ соответствует отсутствию плавления подложки под каплей, а следовательно, и отсутствию адгезии.

Используя полученные температурные условия адгезии, были построены расчетные зависимости температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющие границу адгезии, и рассчитано условие адгезии в размерном и безразмерном видах для пар капля–подложка из одинаковых и разнородных материалов. В качестве материала капли и подложки в работе рассматривались олово и свинец с относительно низкой температурой плавления. Они не используются в качестве упрочняющих

щих покрытий, однако эти материалы имеют низкие температуры плавления и их использование в экспериментальных исследованиях значительно снижает трудности и погрешности при температурных измерениях. Это позволяет получить достоверные данные, составляющие физическую основу рассматриваемой задачи, которые можно перенести на более тугоплавкие материалы.

Для пар капля–подложка из одинаковых материалов олово–олово и свинец–свинец вследствие равной теплопроводности выравнивание температуры в зоне контакта происходит на одинаковую глубину, как в сторону капли, так и в сторону подложки. Схематично слой капли и подложки из одного материала с выровненной температурой в зоне контакта представлены на рис. 4. В начальный интервал времени взаимодействия температура в зоне контакта капли и подложки выравнивается на одинаковые расстояния от границы, т. е. $l_1=l_2$.

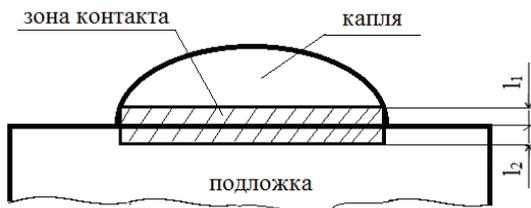


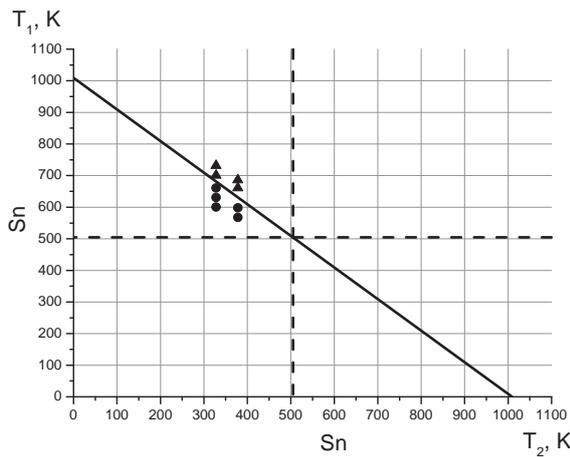
Рис. 4. Схема области выравнивания температур капли и подложки из одного материала в начальный интервал времени. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части

Fig. 4. Diagram of temperature equalization region of a drop and substrate of the same material at the initial time. Drop and substrate contact area corresponds to the dashed part

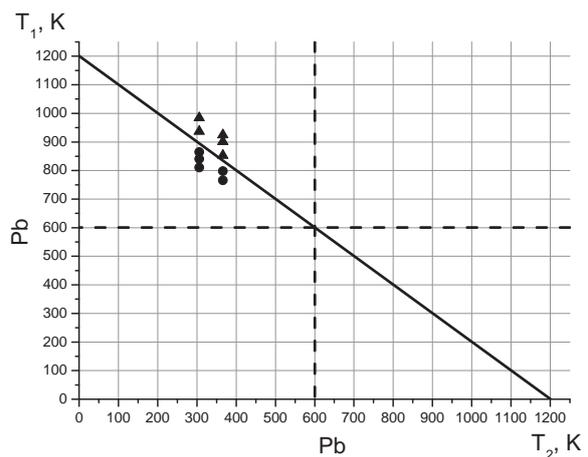
При расчете критерия адгезии теплопроводности, теплоемкости и плотности олова для его жидкой и твердой фазы принимались равными $\lambda_{Sn(l)}=34,3$ Вт/(м·К), $c_{Sn(l)}=226$ Дж/(кг·К), $\rho_{Sn(l)}=6990$ кг/м³, $\lambda_{Sn(s)}=60$ Вт/(м·К), $c_{Sn(s)}=226$ Дж/(кг·К), $\rho_{Sn(s)}=7290$ кг/м³. Для жидкой и твердой фаз свинца эти параметры принимались равными $\lambda_{Pb(l)}=15,8$ Вт/(м·К), $c_{Pb(l)}=141,5$ Дж/(кг·К), $\rho_{Pb(l)}=10645$ кг/м³ и $\lambda_{Pb(s)}=28,14$ Вт/(м·К), $c_{Pb(s)}=130$ Дж/(кг·К), $\rho_{Pb(s)}=11005$ кг/м³ соответственно. Температура плавления свинца T_{Pb} и олова T_{Sn} равны $T_{Pb}=600,5$ К и $T_{Sn}=504,9$ К соответственно [26]. На рис. 5 приведены графики прямых, соответствующих расчетным критериям адгезии.

Точки, находящиеся выше прямых, должны соответствовать наличию адгезии капель на подложке. Для точек, находящихся ниже прямых, адгезия должна отсутствовать. Точки, лежащие на самой расчетной зависимости, могут соответствовать отсутствию, наличию или частичной адгезии. Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной пунктирной линии – безразмерная температура плавления капли.

На рис. 6 для этих же пар материалов (а) Sn–Sn, б) Pb–Pb) представлены графики безразмерных расчетных зависимостей температуры капли T_1/T_s от безразмерной температуры подложки T_2/T_s , определяющие границу адгезии, где T_1, T_2 – температуры капли и подложки соответственно; T_s – температура плавления подложки. Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной – безразмерная температура плавления капли.



а/а



б/б

Рис. 5. Графики расчетных зависимостей температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющей границу адгезии и экспериментальные точки для пар капля–подложка: а) олово–олово; б) свинец–свинец

Fig. 5. Graphs of drop temperature T_1 calculated dependences on substrate temperature T_2 which determine the adhesion boundary and experimental points for pairs: а) Sn–Sn; б) Pb–Pb

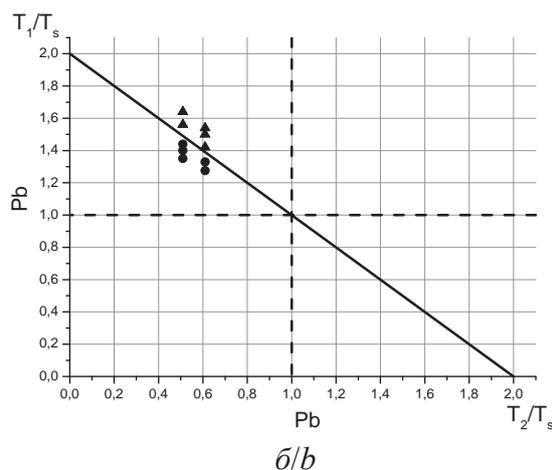
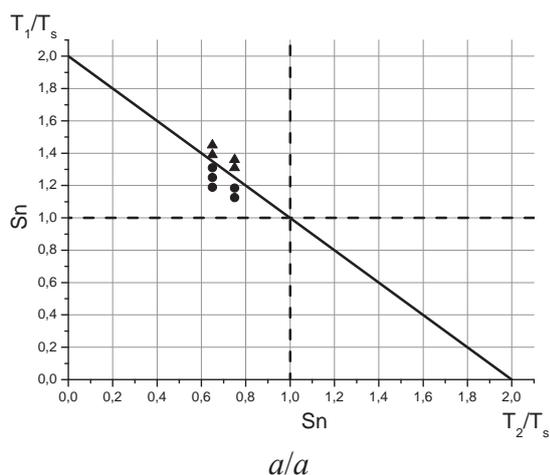


Рис. 6. Графики безразмерных расчетных зависимостей безразмерной температуры капли T_1/T_s от безразмерной температуры подложки T_2/T_s , определяющей границу адгезии и экспериментальные точки для пар: а) олово–олово; б) свинец–свинец

Fig. 6. Graphs of nondimensional calculated dependences of dimensionless drop temperature T_1/T_s on dimensionless substrate temperature T_2/T_s , which determines the adhesion boundary and experimental points for pairs: а) Sn–Sn; б) Pb–Pb

Проведен расчет температурного условия адгезии для пар расплавленная капля – подложка из разнородных материалов: свинцовая капля – оловянная подложка (Pb–Sn) и оловянная капля – свинцовая подложка (Sn–Pb). Для материалов с различными коэффициентами теплопроводности λ выравнивание температуры в зоне контакта у капли и подложки происходит на различных расстояниях, пропорциональных их величинам теплопроводности: $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. Схематично слои с выровненной температурой в зоне контакта для оловянной капли и свинцовой подложки показаны на рис. 7, а для свинцовой капли и оловянной подложки представлены на рис. 8. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части.

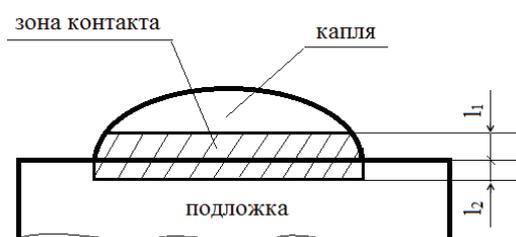


Рис. 7. Схема области выравнивания температур оловянной капли и свинцовой подложки в начальный интервал времени. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части

Fig. 7. Diagram of temperature equalization region of a tin drop and a lead substrate at the initial time. Drop and substrate contact area corresponds to the dashed part

Из рис. 7 видно, что толщина граничного слоя оловянной капли, в котором происходит выравнивание температуры, больше толщины соответствующего слоя свинцовой подложки, тогда как в случае свинцовой капли и оловянной подложки

(рис. 8) толщина граничного слоя подложки с выровненной температурой больше толщины соответствующего слоя капли.

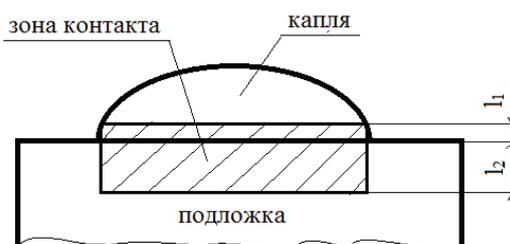


Рис. 8. Схема области выравнивания температур свинцовой капли и оловянной подложки в начальный интервал времени. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части

Fig. 8. Diagram of temperature equalization region of a lead drop and a tin substrate at the initial time. Drop and substrate contact area corresponds to the dashed part

Минимальные температуры капли и подложки для пар Sn–Pb и Pb–Sn, соответствующие появлению адгезии, определялись из выражений теплового баланса между граничными слоями капли и подложки. Выровненная температура граничных слоев капли олова и свинцовой подложки T_{Sn-Pb}^* , а также свинцовой капли и оловянной подложки T_{Pb-Sn}^* определялись выражениями:

$$T_{Sn-Pb}^* = \frac{c_{Sn(l)} \rho_{Sn(l)} T_{Sn(l)} + c_{Pb(s)} \rho_{Pb(s)} \frac{\lambda_{Pb(s)}}{\lambda_{Sn(l)}} T_{Pb(s)}}{c_{Sn(l)} \rho_{Sn(l)} + \rho_{Pb(s)} c_{Pb(s)} \frac{\lambda_{Pb(s)}}{\lambda_{Sn(l)}}},$$

$$T_{Pb-Sn}^* = \frac{c_{Pb(l)} \rho_{Pb(l)} T_{Pb(l)} + c_{Sn(s)} \rho_{Sn(s)} \frac{\lambda_{Sn(s)}}{\lambda_{Pb(l)}} T_{Sn(s)}}{c_{Pb(l)} \rho_{Pb(l)} + \rho_{Sn(s)} c_{Sn(s)} \frac{\lambda_{Sn(s)}}{\lambda_{Pb(l)}}}.$$

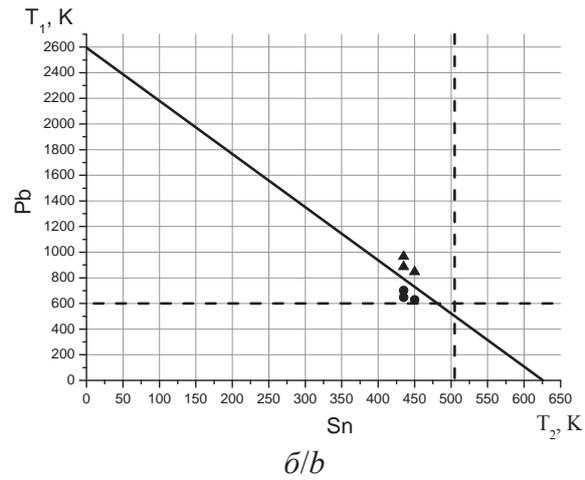
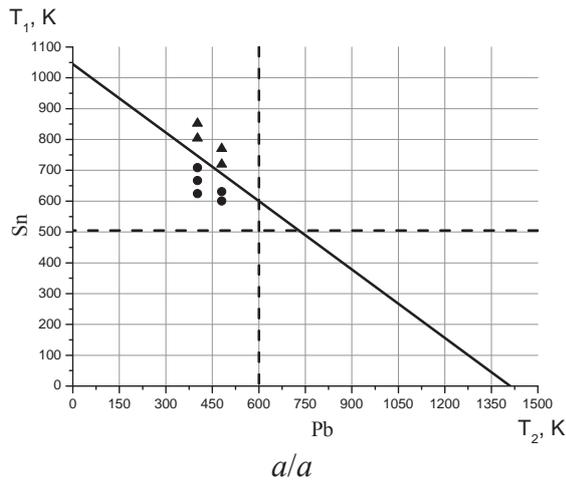


Рис. 9. Графики расчетных зависимостей границы адгезии. Экспериментальные точки, показывающие наличие или отсутствие адгезии, соответствуют температуре капли T_1 и температуре подложки T_2 для пар: а) олово–свинец; б) свинец–олово

Fig. 9. Graphs of the calculated dependences of adhesion boundaries. The experimental points indicating adhesion presence or absence correspond to the temperature of a drop T_1 and temperature of a substrate T_2 for pairs: a) tin–lead; b) lead–tin

На рис. 9 представлены графики расчетной зависимости температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющие границу адгезии для пар олово–свинец (а) и свинец–олово (б). Точки, находящиеся выше расчетной зависимости, должны соответствовать наличию адгезии, точки, находящиеся ниже зависимости, должны соответствовать отсутствию адгезии. Точки, находящиеся на прямой, могут соответствовать как наличию, так и отсутствию или частичной адгезии. Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной пунктирной линии – безразмерная температура плавления капли.

На рис. 10 представлены графики расчетной зависимости температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющие границу адгезии и экспериментальные точки для пар олово–свинец (а) и свинец–олово (б) в безразмерном виде.

Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной пунктирной линии – безразмерная температура плавления капли.

Экспериментальная проверка температурного условия адгезии

Для проверки адекватности полученного температурного условия адгезии проведены экспери-

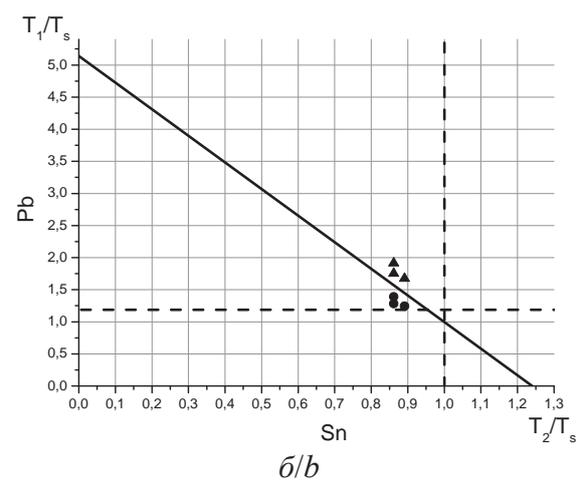
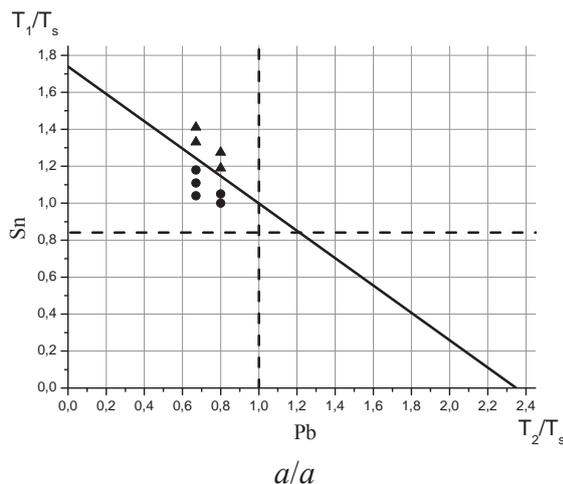


Рис. 10. Графики безразмерных расчетных зависимостей безразмерной температуры капли T_1/T_s и безразмерной температуры подложки T_2/T_s , соответствующие границе адгезии и экспериментальные точки для пар: а) олово–свинец; б) свинец–олово, где T_1 , T_2 – температуры капли и подложки соответственно; T_s – температура плавления подложки

Fig. 10. Graphs of nondimensional calculated dependences of dimensionless drop temperature T_1/T_s and dimensionless substrate temperature T_2/T_s corresponding adhesion boundary and experimental points for pairs: a) tin–lead; b) lead–tin, where T_1 , T_2 are the temperatures of a drop and substrate correspondingly; T_s is the substrate melting temperature

ментальные исследования адгезии капель расплавленного олова на оловянной и свинцовой подложках, а также каплю расплава свинца на свинцовой и оловянной подложках. Так как значения температур плавления этих металлов невысоки, это позволяет считать, что при падении жидкой капли с высоты, не превышающей 0,02...0,04 м, ее начальная температура за это время изменяется незначительно. Благодаря сравнительно невысоким температурам для измерений использована одна из наиболее чувствительных термопар – хромель-копелевая термопара. Окисная пленка с каплей олова и свинца перед их падением убиралась путем добавления к расплавленным каплям крупинки канифоли. Для уменьшения окисления поверхности подложки время ее нагрева сокращалось до минимума, и перед падением капли поверхность подложки зачищалась.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 11. Нагрев капли металла – 1 осуществлялся в трубчатом кварцевом нагревателе. Один выход кварцевой трубки – 2 был открыт. Подогрев трубки осуществлялся проволочным нагревателем из нихрома – 3. Теплоизоляцией нагревателя служила каолиновая вата – 4, закрепленная на трубчатом нагревателе лентой из стеклоткани. Температура капли контролировалась стандартной предварительно откалиброванной хромель-копелевой термопарой – 5.

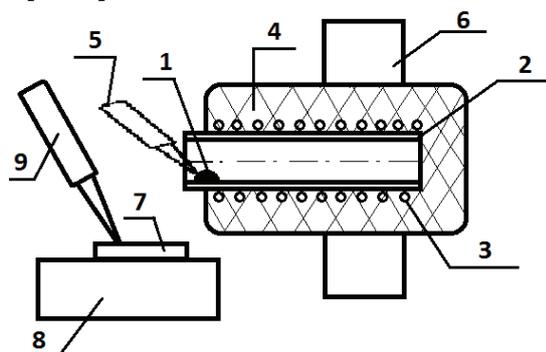


Рис. 11. Схема установка для определения температур капли и подложки, при которых происходит адгезия капли к поверхности

Fig. 11. Diagram of the unit to determine the drop and substrate temperatures required for drop-surface adhesion

Для всех проведенных экспериментов нагретая частица металла представляла собой каплю расплава диаметром $(2...4) \cdot 10^{-3}$ м. При достижении заданной температуры (превышающей температуру плавления металла) кварцевый нагреватель поворотным устройством – 6 переводился в наклонное положение, и капля расплава – 1 падала на поверхность подложки – 7. Нагрев подложки – 7, изготовленной в форме пластины, проводился с помощью плоского электронагревателя – 8, расположенного под пластиной исследуемого материала.

Температура поверхности в точке падения капли расплава измерялась хромель-копелевой термопарой – 9.

Температуры капель и подложки выбирались в соответствии с результатами численных исследований (рис. 5, 6, 9, 10) таким образом, чтобы их значения находились в областях выше и ниже расчетной зависимости, определяющей границу адгезии, а также на этой границе.

Качество адгезии проверяли методом среза капли с подложки. Адгезия оценивалась по виду среза. Если при давлении ножа на боковую стенку капли отрыв происходил по поверхности контакта, то считалось, что адгезия отсутствовала. Наличие адгезии определяли в том случае, когда место среза имело блестящую зеркальную поверхность. Качество адгезии оценивали по отношению площади блестящей поверхности среза к полной площади образовавшегося из капли сплэта. В случае, если это отношение близко к единице, адгезия капли на поверхность подложки считалась полной.

Результаты экспериментальных исследований для пар олово–олово (а) и свинец–свинец (б) приведены на рисунках 5, 6, 9, 10 в виде точек, расположенных выше, ниже и на границе, определяющей адгезию. Для температур капли и подложки, находящихся ниже прямых, адгезия отсутствует. Если температуры капли и подложки расположены на самой расчетной зависимости, это может соответствовать отсутствию, наличию или частичной адгезии. Неопределенность наличия адгезии для точек, лежащих на расчетной зависимости или близких к ней, обусловлена тем, что к исходным температурам капли и подложки добавляется температура дополнительного нагрева от энергии удара капли о поверхность подложки. Вклад добавочной температуры энергии удара зависит от скорости частицы и может быть существенным при около- и сверхзвуковых скоростях. При скоростях частиц менее 100 м/с вклад добавочной температуры энергии удара несущественен и им можно пренебречь [25].

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показали их соответствие полученным численно выражениям температурного условия адгезии (4).

Заключение

Полученные температурные условия адгезии могут быть использованы для предварительной оценки вероятности адгезии расплавленных порошковых материалов. Для этого достаточно определить температуру плавления подложки, теплофизические характеристики материалов, начальные температуры капли и подложки. Введение предложенного температурного условия адгезии в математические модели взаимодействия капли с подложкой вносит условия, необходимые для получения качественного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recent development in the research of splat formation process in thermal spraying / Yang Kun, Liu Min Zhou, Deng Chang-guang // Hindawi Publishing Corporation Journal of Materials. – 2013. – V. 2013. – P. 1–14.
2. Солоненко О.П. Растекание и затвердевание на подложке капли металла с высокой объемной концентрацией твердых тугоплавких включений // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 1. – С. 37–44.
3. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е. Нанесение покрытий плазмой. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
4. Houben J.M. Future development in plasma spraying // Proceedings of the 2nd National Conference on Thermal Spray / ed. by F.N. Longo. – Long Beach, California, 1984. – P. 1–19.
5. Fukumoto M., Hayashi H., Yokoyama T. Relationship between particle's splat pattern and coating adhesive strength of HVOF sprayed Cu-alloy // Journal of Japan Thermal Spraying Society. – 1995. – V. 2. – № 2. – P. 149–156.
6. Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes / M. Vardelle, A. Vardelle, A.C. Leger, P. Fauchais, D. Gobin // Journal of Thermal Spray Technology. – 1995. – V. 4. – № 4. – P. 50–58.
7. Role of condensates and adsorbates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray / X. Jiang, Y. Wan, H. Herman, S. Sampath // Thin Solid Films. – 2001. – V. 385. – № 1–2. – P. 132–141.
8. Fukumoto M., Nagai H., Yasui T. Influence of surface character change of substrate due to heating on flattening behavior of thermal sprayed particles // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – V. 15. – № 4. – P. 759–764.
9. Huang R., Fukanuma H. Study of influence of particle velocity on adhesive strength of cold spray deposit // Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – V. 21. – Iss. 3–4. – P. 541–549.
10. Effect of substrate surface change by heating on transition in flattening behavior of thermal sprayed particles / M. Fukumoto, I. Ohgitani, M. Shiiba, T. Yasui // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. – Osaka, Japan, May 2004. – P. 246–251.
11. Effect of substrate temperature and roughness on the solidification of copper plasma sprayed droplets / D.K. Christoulis, D.I. Pantelis, N. de Dave-Fabrigue, F. Borit, V. Guipont, M. Jeandin // Materials Science and Engineering A. – 2008. – № 1–2. – V. 485. – P. 119–129.
12. Influence of surface laser cleaning combined with substrate preheating on the splat morphology / S. Costil, H. Liao, A. Gammoudi, C. Coddet // Journal of Thermal Spray Technology. – 2005. – № 1. – V. 14. – P. 31–38.
13. Heichal Y., Chandra S. Predicting thermal contact resistance between molten metal droplets and a solid surface // Journal of Heat Transfer. – 2005. – V. 127. – № 11. – P. 1269–1275.
14. Fukumoto M., Katoh S., Okane I. Splat behavior of plasma sprayed particles on flat substrate surface // Proceedings of the 14th International Thermal Spray Conference. Ed. by A. Ohmori, Japan, High Temperature Society, 1995. – P. 353–358.
15. Dhiman R., McDonald A.G., Chandra S. Predicting splat morphology in a thermal spray process // Surface and Coatings Technology. – 2007. – V. 201. – № 18. – P. 7789–7801.
16. Three-dimensional transition map of flattening behavior in the thermal spray process / M. Fukumoto, M. Shiiba, H. Kaji, T. Yasui // Pure and Applied Chemistry. – 2005. – V. 77. – № 2. – P. 429–442.
17. Chang-wen C., Qiang L. Three-dimensional numerical simulation of splat formation on substrates in plasma spraying // J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci). – 2011. – № 16 (3). – P. 347–351.
18. Bussmann M., Mostaghim J., Chandra S. Modelling the Splash of a Droplet Impacting a Solid Surface // Physics of Fluids. – 2000. – № 12. – P. 3121–3132.
19. Mathematical modelling and numerical simulation of splat cooling in plasma spray coatings / H. Fukanuma, R. Huang, Y. Tanaka, Y. Uesugi // JTTEE5. – 2009. – V. 18. – № 5–6. – P. 965–974.
20. Modeling fragmentation of plasma-sprayed particles impacting on a solid surface at room temperature / A. McDonald, M. Xue, S. Chandra, J. Mostaghimi, C. Moreau // Comptes Rendus Mecanique. – 2007. – V. 335. – № 5–6. – P. 351–356.
21. Numerical simulation of nucleation, solidification, and microstructure formation in thermal spraying / H. Zhang, X.Y. Wang, L.L. Zheng, S. Sampath // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47. – № 10–11. – P. 2191–2203.
22. Немова Т.Н., Колесникова Е.А. Определение температурного поля подложки под каплей расплава методом выравнивания температур соседних слоев // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 12/2. – С. 161–166.
23. Колесникова Е.А., Немова Т.Н. Влияние формы частицы на границу плавления в системе капля-подложка. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 223–224.
24. Колесникова Е.А., Немова Т.Н. Расчет температурного поля по методу выравнивания температур и сравнение с результатами эксперимента // Современные техника и технологии: XIX Междунар. научно-практ. конф. – Томск, 2013. – С. 223–224. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C01/V3/108.pdf> (дата обращения: 26.05.2014).
25. Углов А.А., Иванов Е.М. Контактные температуры в области малых времен для задач с плавлением и кристаллизацией // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 4. – С. 50–55.
26. Физические величины: справочник / под ред. И.С.Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Поступила 27.05.2014 г.

UDC 531.66;532.696

DETERMINATION OF THERMAL FIELDS AND ADHESION TEMPERATURE CONDITIONS IN THE MODEL «LIQUID-ALLOY DROPLET – SUBSTRATE»

Elena A. Kolesnikova,

Tomsk State University of Architecture and Construction, 2, Solyanaya Square,
Tomsk, 634003, Russia. E-mail: alko.gm@gmail.com

The relevance of the discussed issue is caused by the need to advance thermal spray technology and the methods for determining the process best performance.

The main aim of the study is to determine thermal fields and adhesion temperature conditions in the model «liquid-alloy droplet – substrate».

The methods used in the study: the mathematical modeling for thermal fields and adhesion temperature conditions in the model «liquid-alloy droplet – substrate»; experimental validation of the results calculated with the proposed model.

The results. The paper introduces the method for determining thermal fields in the model «liquid-alloy droplet – substrate» based on equalization of temperatures of fixed identical small size neighboring cubic volumes. The method is based on the concept that non-steady process of thermal heating approaches to steady-state process as time and dimensional gaps are reduced. The provided method is free from using differential equations. The calculation of non-steady thermal field is based on thermal transmission equation (algebraic equations). Adhesion temperature conditions for a droplet impacting on a solid surface are obtained. The thermal condition of adhesion is based on substrate melting. Partial adhesion corresponds to melting of the part of substrate surface, total adhesion corresponds to melting of the whole substrate surface. The proposed thermal adhesion condition is valid in case of lack of intermetallic compounds formation between spat and substrate materials. The calculated results are in accordance with the experimental data.

Key words:

Adhesion, droplet, liquid-alloy, substrate, contact temperature, melting temperature, thermal field.

REFERENCES

1. Yang Kun, Liu Min Zhou, Deng Changguang. Recent development in the research of splat formation process in thermal spraying. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Materials*, 2013, vol. 2013, pp. 1–14.
2. Solonenko O.P. Rastekanie i zatverdevanie na podlozhke kapli metala s visokoy obemnoy kontsentratsiyey tverdykh tugoplavkikh vklyucheny [Flattening and solidification of droplet with high volume density of solid heat-resistant particles on substrate surface]. *Technical Physics Letters*, 2012, vol. 38, no. 1, pp. 37–44.
3. Kudinov V.V., Pekshev P.U., Belashenko V.E. *Nanesenie pokryty plazmoy* [Thermal spray coatings]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 408 p.
4. Houben J.M. Future development in thermal spraying. *Proc. of the 2nd National Conference on Thermal Spray*. Ed. by F.N. Longo. Long Beach, California, 1984. pp. 1–19.
5. Fukumoto M., Hayashi H., Yokoyama T. Relationship between particle's splat pattern and coating adhesive strength of HVOF sprayed Cu-alloy. *Journal of Japan Thermal Spraying Society*, 1995, no. 2, vol. 2, pp. 149–156.
6. Vardelle M., Vardelle A., Leger A.C., Fauchais P., Gobin D. Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1995, no. 4, vol. 4, pp. 50–58.
7. Jiang X., Wan Y., Herman H., Sampath S. Role of condensates and adsorbates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray. *Thin Solid Films*, 2001, no. 1–2, vol. 385, pp. 132–141.
8. Fukumoto M., Nagai H., Yasui T. Influence of surface character change of substrate due to heating on flattening behavior of thermal sprayed particles. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, no. 4, vol. 15, pp. 759–764.
9. Huang R., Fukanuma H. Study of influence of particle velocity on adhesive strength of cold spray deposit. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, Iss. 3–4, pp. 541–549.
10. Fukumoto M., Ohgitani I., Shiiba M., Yasui T. Effect of substrate surface change by heating on transition in flattening behavior of thermal sprayed particles. *Proc. of the International Thermal Spray Conference*. Osaka, Japan, May 2004. pp. 246–251.
11. Christoulis D.K., Pantelis D.I., N. de Dave-Fabrigue, Borit F., Guipont V., Jeandin M. Effect of substrate temperature and roughness on the solidification of copper plasma sprayed droplets. *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 485, no. 1–2, pp. 119–129.
12. Costil S., Liao H., Gammoudi A., Coddet C. Influence of surface laser cleaning combined with substrate preheating on the splat morphology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, vol. 14, no. 1, pp. 31–38.
13. Heichal Y., Chandra S. Predicting thermal contact resistance between molten metal droplets and a solid surface. *Journal of Heat Transfer*, 2005, vol. 127, no. 11, pp. 1269–1275.
14. Fukumoto M., Katoh S., Okane I. Splat behavior of plasma sprayed particles on flat substrate surface. *Proc. of the 14th International Thermal Spray Conference*. Ed. by A. Ohmori. Japan, High Temperature Society, 1995. pp. 353–358.
15. Dhiman R., McDonald A.G., Chandra S. Predicting splat morphology in a thermal spray process. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, no. 18, pp. 7789–7801.
16. Fukumoto M., Shiiba M., Kaji H., Yasui T. Three-dimensional transition map of flattening behavior in the thermal spray process. *Pure and Applied Chemistry*, 2005, vol. 77, no. 2, pp. 429–442.
17. Chang-wen C., Qiang L. Three-dimensional numerical simulation of splat formation on substrates in plasma spraying. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci)*, 2011, no. 16 (3), pp. 347–351.
18. Bussmann M., Mostaghim J., Chandra S. Modelling the Splash of a Droplet Impacting a Solid Surface. *Physics of Fluids*, 2000, no. 12, pp. 3121–3132.
19. Fukanuma H., Huang R., Tanaka Y., Uesugi Y. Mathematical modelling and numerical simulation of splat cooling in plasma spray coatings. *JTTEE5*, 2009, vol. 18, no. 5–6, pp. 965–974.
20. McDonald A., Xue M., Chandra S., Mostaghimi J., Moreau C. Modeling fragmentation of plasma-sprayed particles impacting on a solid surface at room temperature. *Comptes Rendus Mecanique*, 2007, vol. 335, no. 5–6, pp. 351–356.

21. Zhang H., Wang X.Y., Zheng L.L., Sampath S. Numerical simulation of nucleation, solidification, and microstructure formation in thermal spraying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, no. 10–11, pp. 2191–2203.
22. Nemova T.N., Kolesnikova E.A. Opredelenie temperaturnogo polya podlozhki pod kapley rasplava metodom vyravnivaniya temperatur sosednikh sloev [Temperature field determination based on temperature equalization of fixed identical small size neighboring cubic volumes]. *The bulletin of University, Physic*, 2010, vol. 53, no. 12/2, pp. 161–166.
23. Kolesnikova E.A., Nemova T.N. Vliyaniye formy chastitsy na granitsu plavleniya v sisteme kaplya-podlozhka [Influence of splat formation on melting boundary in the model droplet–substrate]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, pp. 88–92.
24. Kolesnikova E.A., Nemova T.N. Raschet temperaturnogo polya po metodu vyravnivaniya temperatur i sravnenie s rezultatmi eksperimenta [Thermal field calculation based on temperature equalization of fixed identical small size neighboring cubic volumes and comparing with experimental data]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii. XIX Mezhdunarodnaya nauchno-practicheskaya konferentsiya* [Proc. 20th Int. conf. Advanced engineering and technology]. Tomsk, 2013. pp. 223–224. Available at: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C01/V3/108.pdf> (accessed 26 May 2014).
25. Uglov A.A., Ivaniv E.M. Kontaktnye temperatury v oblasti mal'kikh vremen dlya zadach s plavleniem i kristalizatsiyey [Contact temperatures in low-interval area during melting and solidification]. *Phisika i khimiya obrabotki materialov*, 1998, no. 4, pp. 50–55.
26. *Phizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Ed. by I.S. Grigoryev, E.Z. Meylikhov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.

Received: 27 May 2014.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ

Симонян Саргис Оганесович,

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информационных технологий
и автоматизации Национального политехнического университета Армении
(Политехник), Республика Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105.
E-mail: ssimonyan@seua.am

Актуальность работы обусловлена необходимостью эффективного определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура–Пенроуза, достаточно часто встречающихся при решении различных задач науки и техники, как частного случая, действительных обобщенных обратных матриц, широко используемых в различных геоинформационных системах.

Цель исследования: разработка конструктивных аналитических и численно-аналитических методов определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура–Пенроуза.

Методы исследования. При решении рассматриваемой задачи были использованы методы линейной алгебры, методы теории матриц, а также прямые и обратные дифференциальные преобразования Г.Е. Пухова, отличающиеся от общеизвестных интегральных преобразований тем, что переход из области оригиналов в область изображений осуществляется в общем случае на основе более простой операции – операции дифференцирования (в отличие от операции интегрирования при интегральных преобразованиях), а обратный переход – также на основе простой операции суммирования (в отличие от операции интегрирования при интегральных преобразованиях).

Результаты. Предложены конструктивные аналитические и численно-аналитические методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура–Пенроуза. Аналитические методы основаны на предложенных декомпозиционных матрично-блочных представлениях, а численно-аналитические методы – на совместном использовании этих представлений и дифференциальных преобразований. Если аналитические методы практически применимы при малых размерах рассматриваемых матриц и простых их аналитических элементах, то численно-аналитические методы применимы в общем случае. С другой стороны, фактически решение исходной непрерывной задачи сводится к решению некоторой рекуррентной цепочки ряда дискретных задач с числовыми решениями (на первом этапе вычислений), а затем к восстановлению на их основе непрерывного решения исходной непрерывной задачи (на втором этапе вычислений). Эти обстоятельства обуславливают простоту реализации численно-аналитических методов применением средств современных информационных технологий.

Ключевые слова:

Геоинформатика, геоинформационные технологии и системы, метод наименьших квадратов, комплексные однопараметрические матрицы, обобщенные обратные матрицы, декомпозиция, матрично-блочные представления, дифференциальные преобразования, матричные дискреты, матрично-блочный столбцовый эквивалент, матрично-блочный строчный эквивалент.

Введение

Обобщенные обратные матрицы широко используются в различных областях науки и техники [1–9] и, в частности, при решении нормальных уравнений свободных геодезических сетей [8], параметрических и стохастических задач астрометрии и космической геодезии [9], планирования и оптимизации горных работ [10] и др. Следовательно, разработка эффективных методов их определения является важной научно-практической задачей специального математического обеспечения геоинформационных систем с широким использованием возможностей современных компьютерных технологий и геостатистики [10–12].

В однопараметрических матрицах $A(t)_{n \times m}$ (параметром может быть временем, оператором Лапласа $(S \sim \frac{d}{dt})$ или другим параметром) для определения соответствующих обобщенных обратных матриц $X(t) = A^+(t)_{n \times m}$ Мура–Пенроуза [1] на основе дифференциальных преобразований Пухова [13–16] в работах [17–21] были предложены различные дифференциальные аналоги определения этих матриц. В настоящей работе рассматриваются комплексные однопараметрические матрицы и предлагаются соответствующие им конструктивные декомпозиционные аналитические и численно-аналитические

методы определения $X(t) = A^+(t)_{n \times m}$. Заметим, что для этих матриц должны быть выполнены следующие обобщенные условия Мура–Пенроуза

$$A(t)X(t)A(t) = A(t), \quad (1)$$

$$X(t)A(t)X(t) = X(t), \quad (2)$$

$$[A(t)X(t)]^* = A(t)X(t), \quad (3)$$

$$[X(t)A(t)]^* = X(t)A(t), \quad (4)$$

Математический аппарат

Комплексную однопараметрическую матрицу $A(t)_{n \times m}$ представим в виде декомпозиционного соотношения

$$A(t)_{m \times n} = B(t)_{m \times n} + jC(t)_{m \times n}, \quad (5)$$

а соответствующую ей обобщенную обратную матрицу – в виде соотношения

$$X(t)_{n \times m} = A^+(t)_{n \times m} = F(t)_{n \times m} + jG(t)_{n \times m}. \quad (6)$$

В соотношениях (5), (6) матрицы $B(t)$ и $F(t)$ – матрицы действительных частей, матрицы $C(t)$ и $G(t)$ – матрицы мнимых частей матриц $A(t)$ и $X(t)$ соответственно, а $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Пусть существуют дифференциальные преобразования однопараметрических матриц $B(t)$, $C(t)$ и $F(t)$, $G(t)$, т. е.

$$B(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K B(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_0}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot}$$

$$\overline{\cdot} B(t) = \mathfrak{N}_1(t, t_0, H, B(K), K = \overline{0, \infty}); \quad (7)$$

$$C(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K C(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_0}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot}$$

$$\overline{\cdot} C(t) = \mathfrak{N}_2(t, t_0, H, C(K), K = \overline{0, \infty}); \quad (8)$$

$$F(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K F(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_0}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot}$$

$$\overline{\cdot} F(t) = \mathfrak{N}_3(t, t_0, H, F(K), K = \overline{0, \infty}); \quad (9)$$

$$G(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K G(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_0}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\cdot}$$

$$\overline{\cdot} G(t) = \mathfrak{N}_4(t, t_0, H, G(K), K = \overline{0, \infty}). \quad (10)$$

В соотношениях (7)–(10) левые части – прямые преобразования; правые части – обратные преобразования; $K = \overline{0, \infty}$ – целочисленный аргумент; $B(K)$, $C(K)$ и $F(K)$, $G(K)$, $K = \overline{0, \infty}$ – матричные дискреты матричных оригиналов $B(t)$, $C(t)$ и $F(t)$, $G(t)$ соответственно с размерами $m \times n$ и $n \times m$; t_0 – центр аппроксимации; $\mathfrak{N}_1(\bullet)$, $\mathfrak{N}_2(\bullet)$ и $\mathfrak{N}_3(\bullet)$, $\mathfrak{N}_4(\bullet)$ – матричные функции, восстанавливающие оригиналы – матрицы $B(t)$, $C(t)$ и $F(t)$, $G(t)$ соответственно; символ $\overline{\cdot}$ – знак перехода из области оригиналов в область D-изображений и наоборот [13–16].

Теперь воспользуемся подходом, предложенным в [21], и представим новые аналитические и численно-аналитические методы определения обобщенных обратных матриц $X(t)_{n \times m} = A^+(t) \in C^{n \times m}$.

Аналитическое решение (1-й вариант). Потребуем, чтобы имело место следующее известное условие [2]:

$$A^T(t)A(t)X(t) = A^T(t). \quad (11)$$

С учетом (5) и (6) условие (11) приобретает вид:

$$[B(t) + jC(t)]^T [B(t) + jC(t)] [F(t) + jG(t)] = [B(t) + jC(t)]^T. \quad (12)$$

Раскрыв (12) и приравнявая действительные и мнимые матричные слагаемые в левой и правой частях, получим

$$\begin{cases} [B^T(t)B(t) - C^T(t)C(t)]F(t) - \\ - [B^T(t)C(t) + C^T(t)B(t)]G(t) = B^T(t), \\ [B^T(t)C(t) + C^T(t)B(t)]F(t) + \\ + [B^T(t)B(t) - C^T(t)C(t)]G(t) = C^T(t). \end{cases} \quad (13)$$

Систему матричных уравнений (13) можно представить и в виде следующего матрично-блочного столбцевого эквивалента

$$\begin{bmatrix} [B^T(t)B(t) - C^T(t)C(t)] & [-B^T(t)C(t) - C^T(t)B(t)] \\ [B^T(t)C(t) + C^T(t)B(t)] & [B^T(t)B(t) - C^T(t)C(t)] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \times \begin{bmatrix} F(t) \\ G(t) \end{bmatrix}_{2n \times m} = \begin{bmatrix} B^T(t) \\ C^T(t) \end{bmatrix}_{2n \times m}, \quad (14)$$

откуда можно найти аналитическое решение

$$\begin{bmatrix} F(t) \\ G(t) \end{bmatrix}_{2n \times m} = \begin{bmatrix} [B^T(t)B(t) - C^T(t)C(t)] & [-B^T(t)C(t) - C^T(t)B(t)] \\ [B^T(t)C(t) + C^T(t)B(t)] & [B^T(t)B(t) - C^T(t)C(t)] \end{bmatrix}_{2n \times 2n}^{-1} \times \begin{bmatrix} B^T(t) \\ C^T(t) \end{bmatrix}_{2n \times m} = \begin{bmatrix} B^T(t) & -C^T(t) \\ C^T(t) & B^T(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n}^{-1} \times \begin{bmatrix} B^T(t) \\ C^T(t) \end{bmatrix}_{2n \times m} = D_1^{-1}(B(t), C(t)) \begin{bmatrix} B^T(t) \\ C^T(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

и, следовательно, в соответствии с (6) и известную матрицу $X(t) = A^+(t)$.

Аналитическое решение (2-й вариант). В соответствии с [6] потребуем, чтобы имело место также известное условие [2]:

$$X(t)A(t)A^T(t) = A^T(t). \quad (16)$$

С учетом (5) и (6) условие (16) приобретает вид:

$$[F(t) + jG(t)][B(t) + jC(t)][B(t) + jC(t)]^T = [B(t) + jC(t)]^T. \quad (17)$$

Аналогичные преобразования (17) приводят к следующей системе матричных уравнений

$$\begin{cases} F(t)[B(t)B^T(t) - C(t)C^T(t)] - \\ - G(t)[C(t)B^T(t) + B(t)C^T(t)] = B^T(t), \\ F(t)[B(t)C^T(t) + C(t)B^T(t)] - \\ - G(t)[C(t)C^T(t) - B(t)B^T(t)] = C^T(t). \end{cases} \quad (18)$$

Систему (18) можно представить и в виде следующего матрично-блочного строкового эквивалента

$$\begin{aligned}
 & [F(t) \mid G(t)] \times \\
 & \times \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B(t)B^T(t) - \\ -C(t)C^T(t) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(t)C^T(t) + \\ +C(t)B^T(t) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} -B(t)C^T(t) - \\ -C(t)B^T(t) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(t)B^T(t) - \\ -C(t)C^T(t) \end{array} \right] \end{array} \right] = \\
 & = [B^T(t) \mid C^T(t)], \tag{19}
 \end{aligned}$$

откуда аналитическое решение

$$\begin{aligned}
 & [F(t) \mid G(t)]_{n \times 2m} = [B^T(t) \mid C^T(t)] \times \\
 & \times \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B(t)B^T(t) - \\ -C(t)C^T(t) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(t)C^T(t) + \\ +C(t)B^T(t) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} -B(t)C^T(t) - \\ -C(t)B^T(t) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(t)B^T(t) - \\ -C(t)C^T(t) \end{array} \right] \end{array} \right]^{-1} = \\
 & = [B^T(t) \mid C^T(t)]_{n \times 2m} \times \\
 & \times \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B(t) \mid C(t) \\ \hline -C(t) \mid B(t) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B^T(t) \mid C^T(t) \\ \hline -C^T(t) \mid B^T(t) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} B(t) \mid C(t) \\ \hline -C(t) \mid B(t) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B^T(t) \mid C^T(t) \\ \hline -C^T(t) \mid B^T(t) \end{array} \right] \end{array} \right]_{2m \times 2m}^{-1} = \\
 & = [B^T(t) \mid C^T(t)] D_2^{-1}(B(t), C(t)). \tag{20}
 \end{aligned}$$

Заметим, что аналитические решения (15) и (20) практически применимы при малых размерах m и n матриц $A(t)$ с аналитическими элементами.

Численно-аналитическое решение (1-й вариант). В соответствии с дифференциальными изображениями оригиналов-производений, состоящих из трех сомножителей [8. С. 72; Ф. (4.7)], для матричных оригиналов-производений, входящих в матрично-блочную-столбцовую эквивалент (14), будем иметь:

$$\begin{aligned}
 & B^T(t)B(t)F(t) \doteq \sum_{l=0}^K B^T(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)F(l-m), \\
 & C^T(t)C(t)F(t) \doteq \sum_{l=0}^K C^T(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)F(l-m), \\
 & B^T(t)C(t)G(t) \doteq \sum_{l=0}^K B^T(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)G(l-m), \\
 & C^T(t)B(t)G(t) \doteq \sum_{l=0}^K C^T(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)G(l-m), \\
 & B^T(t)C(t)F(t) \doteq \sum_{l=0}^K B^T(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)F(l-m), \\
 & C^T(t)B(t)F(t) \doteq \sum_{l=0}^K C^T(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)F(l-m), \\
 & B^T(t)B(t)G(t) \doteq \sum_{l=0}^K B^T(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)G(l-m), \\
 & C^T(t)C(t)G(t) \doteq \sum_{l=0}^K C^T(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)G(l-m). \tag{21}
 \end{aligned}$$

С учетом соотношений (21) перевод (14) из области оригиналов в область дифференциальных изображений дает:

при $K=0$:

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c} F(0) \\ \hline G(0) \end{array} \right] = \\
 & = \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B^T(0)B(0) - \\ -C^T(0)C(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} -B^T(0)C(0) - \\ -C^T(0)B(0) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} B^T(0)C(0) + \\ +C^T(0)B(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B^T(0)B(0) - \\ -C^T(0)C(0) \end{array} \right] \end{array} \right]^{-1} \times \\
 & \times \left[\begin{array}{c} B^T(0) \\ \hline C^T(0) \end{array} \right] = D_1^{-1}(B(0), C(0)) \left[\begin{array}{c} B^T(0) \\ \hline C^T(0) \end{array} \right], \tag{22}
 \end{aligned}$$

при $K=1$:

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B^T(0)B(0) - \\ -C^T(0)C(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} -B^T(0)C(0) - \\ -C^T(0)B(0) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} B^T(0)C(0) + \\ +C^T(0)B(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B^T(0)B(0) - \\ -C^T(0)C(0) \end{array} \right] \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} F(1) \\ \hline G(1) \end{array} \right] + \\
 & + \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B^T(0)B(1) - \\ -C^T(0)C(1) + \\ +B^T(1)B(0) - \\ -C^T(1)C(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} -B^T(0)C(1) - \\ -C^T(0)B(1) - \\ -B^T(1)C(0) - \\ -C^T(1)B(0) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} B^T(0)C(1) + \\ +C^T(0)B(1) + \\ +B^T(1)C(0) + \\ +C^T(1)B(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B^T(0)B(1) - \\ -C^T(0)C(1) + \\ -C^T(0)B(1) - \\ -C^T(1)C(0) \end{array} \right] \end{array} \right] \times \\
 & \times \left[\begin{array}{c} F(0) \\ \hline G(0) \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} B^T(1) \\ \hline C^T(1) \end{array} \right],
 \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c} F(1) \\ \hline G(1) \end{array} \right] = D_1^{-1}(B(0), C(0)) \times \\
 & \times \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B^T(1) \\ \hline C^T(1) \end{array} \right] - \\ \hline \left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \sum_{l=0}^1 (B^T(l)B(1-l) -) \\ -C^T(l)C(1-l) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} -\sum_{l=0}^1 (B^T(l)C(1-l) +) \\ +C^T(l)B(1-l) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} \sum_{l=0}^1 (B^T(l)C(1-l) +) \\ +C^T(l)B(1-l) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \sum_{l=0}^1 (B^T(l)B(1-l) -) \\ -C^T(l)C(1-l) \end{array} \right] \end{array} \right] \end{array} \right] \times, \tag{23}
 \end{aligned}$$

...
при $K=K$:

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{F(K)}{G(K)} \right]_{2n \times m} &= D_1^{-1}(B(0), C(0)) \times \\
 &\times \left[\begin{array}{c} \left[\frac{B^T(K)}{C^T(K)} \right] - \\ \left[\begin{array}{c|c} \sum_{l=0}^K \left(\begin{array}{c} (B^T(l)B(K-l) -) \\ -C^T(l)C(K-l) \end{array} \right) & - \left[\begin{array}{c} (B^T(l)C(K-l) +) \\ +C^T(l)B(K-l) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} (B^T(l)C(K-l) +) \\ +C^T(l)B(K-l) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} (B^T(l)B(K-l) -) \\ -C^T(l)C(K-l) \end{array} \right] \end{array} \right] \times \\
 \times \left[\frac{F(0)}{G(0)} \right] \\
 = D_1^{-1}(B(0), C(0)) \times \\
 \times \left[\begin{array}{c} \left[\frac{B^T(K)}{C^T(K)} \right] - \\ \left[\begin{array}{c|c} \sum_{l=0}^K \left[\frac{B^T(l)}{C^T(l)} \mid -C^T(l) \right] \times \\ \left[\frac{B(K-l)}{C(K-l)} \mid -C(K-l) \right] \end{array} \right] \times \left[\frac{F(0)}{G(0)} \right] \\
 = D_1^{-1}(B(0), C(0))_{2n \times 2n} \times \\
 \times \left[\begin{array}{c} \left[\frac{B^T(K)}{C^T(K)} \right]_{2n \times m} - \\ - \left[\sum_{l=0}^K D_1(B(l), B(K-l); C(l), C(K-l)) \right]_{2n \times 2n} \left[\frac{F(0)}{G(0)} \right]_{2n \times m} \end{array} \right] \quad (24)
 \end{aligned}$$

Итак, имея матричные дискреты $F(0), G(0); F(1), G(1); \dots F(K), G(K)$ с учетом (22)–(24), в соответствии с правыми частями (9) и (10) можно восстановить оригиналы $F(t)$ и $G(t)$, и, следовательно, $X(t) = A^+(t) = F(t) + jG(t)$.

Численно-аналитическое решение (2-й вариант). Для матричных оригиналов-произведений, входящих в матрично-блочно-строчный эквивалент (19) аналогично (21), будем иметь:

$$\begin{aligned}
 F(t)B(t)B^T(t) &\doteq \sum_{l=0}^K F(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)B^T(l-m), \\
 F(t)C(t)C^T(t) &\doteq \sum_{l=0}^K F(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)C^T(l-m), \\
 G(t)B(t)C^T(t) &\doteq \sum_{l=0}^K G(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)C^T(l-m), \\
 G(t)C(t)B^T(t) &\doteq \sum_{l=0}^K G(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)B^T(l-m), \\
 F(t)B(t)C^T(t) &\doteq \sum_{l=0}^K F(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)C^T(l-m), \\
 F(t)C(t)B^T(t) &\doteq \sum_{l=0}^K F(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)B^T(l-m), \\
 G(t)B(t)B^T(t) &\doteq \sum_{l=0}^K G(K-l) \sum_{m=0}^l B(m)B^T(l-m),
 \end{aligned} \quad (25)$$

$$G(t)C(t)C^T(t) \doteq \sum_{l=0}^K G(K-l) \sum_{m=0}^l C(m)C^T(l-m).$$

С учетом соотношений (25) перевод (19) из области оригиналов в область дифференциальных изображений дает:
при $K=0$:

$$\begin{aligned}
 [F(0) \mid G(0)] &= [B^T(0) \mid C^T(0)] \times \\
 &\times \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B(0)B^T(0) - \\ -C(0)C^T(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(0)C^T(0) + \\ +C(0)B^T(0) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} -B(0)C^T(0) - \\ -C(0)B^T(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(0)B^T(0) - \\ -C(0)C^T(0) \end{array} \right] \end{array} \right]^{-1} = \\
 &= [B^T(0) \mid C^T(0)] D_2^{-1}(B(0), C(0)), \quad (26)
 \end{aligned}$$

при $K=1$:

$$\begin{aligned}
 [F(1) \mid G(1)] &\left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B(0)B^T(0) - \\ -C(0)C^T(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(0)C^T(0) + \\ +C(0)B^T(0) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} -B(0)C^T(0) - \\ -C(0)B^T(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(0)B^T(0) - \\ -C(0)C^T(0) \end{array} \right] \end{array} \right] + \\
 &+ [F(0) \mid G(0)] \times \\
 &\times \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} B(0)B^T(1) - \\ -C(0)C^T(1) + \\ +B(1)B^T(0) - \\ -C(1)C^T(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(0)C^T(1) + \\ +C(0)B^T(1) + \\ +B(1)C^T(0) + \\ +C(1)B^T(1) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} -B(0)C^T(1) - \\ -C(0)B^T(1) - \\ -B(1)C^T(0) - \\ -C(1)B^T(0) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} B(0)B^T(1) - \\ -C(0)C^T(1) + \\ +B(1)B^T(0) - \\ -C(1)C^T(0) \end{array} \right] \end{array} \right] = \\
 &= [B^T(1) \mid C^T(1)],
 \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned}
 [F(1) \mid G(1)] &= \\
 &= \left[\begin{array}{c} [B^T(1) \mid C^T(1)] - [F(0) \mid G(0)] \times \\ \left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} \sum_{l=0}^1 \left(\begin{array}{c} (B(l)B^T(1-l) -) \\ -C(l)C^T(1-l) \end{array} \right) & \left[\begin{array}{c} (B(l)C^T(1-l) +) \\ +C(l)B^T(1-l) \end{array} \right] \\ \hline \left[\begin{array}{c} (B(l)C^T(1-l) +) \\ +C(l)B^T(1-l) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} (B(l)B^T(1-l) -) \\ -C(l)C^T(1-l) \end{array} \right] \end{array} \right] \times \\
 \times D_2^{-1}(B(0), C(0)), \quad (27)
 \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

...
при $K=K$:

$$\begin{aligned}
 & [F(K) \mid G(K)]_{n \times 2m} = \\
 & = \left[\begin{array}{c} [B^T(K) \mid C^T(K)] - [F(0) \mid G(0)] \times \\ \left[\begin{array}{c} \sum_{l=0}^K (B(l)B^T(K-l) - \\ - C(l)C^T(K-l)) \\ \sum_{l=0}^K (B(l)C^T(K-l) + \\ + C(l)B^T(K-l)) \end{array} \right] \end{array} \right] \times \\
 & \quad \times D_2^{-1}(B(0), C(0)) = \\
 & = \left[\begin{array}{c} [B^T(K) \mid C^T(K)] - [F(0) \mid G(0)] \times \\ \left[\begin{array}{c} B(l) \mid C(l) \\ -C(l) \mid B(l) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} B^T(K-l) \mid C^T(K-l) \\ -C^T(K-l) \mid B^T(K-l) \end{array} \right] \end{array} \right] \times \\
 & \quad \times D_2^{-1}(B(0), C(0)) = \\
 & = \left[\begin{array}{c} [B^T(K) \mid C^T(K)]_{n \times 2m} - [F(0) \mid G(0)]_{n \times 2m} \times \\ \left[\sum_{l=0}^K D_2(B(l), B(K-l); C(l), C(K-l)) \right]_{2m \times 2m} \end{array} \right] \times \\
 & \quad D_2^{-1}(B(0), C(0))_{2m \times 2m}. \tag{28}
 \end{aligned}$$

Аналогично, определив матричные дискреты $F(0), G(0); F(1), G(1); \dots; F(K), G(K)$ с учетом (26)–(28), в соответствии с правыми частями (9) и (10), также можно восстановить оригиналы $F(t)$ и $G(t)$ и, следовательно,

$$X(t) = A^+(t) = F(t) + jG(t).$$

И, наконец, сделаем несколько замечаний.

Замечание 1. При матрицах с размерами $m > n$, в соответствии с матричными рекуррентными вычислительными соотношениями, естественно, целесообразнее использование схемы (21)–(24), а при матрицах с размерами $m < n$ – использование схемы (25)–(28) из-за малых размеров матриц $D_1^{-1}(B(0), C(0))_{2n \times 2n}$ и $D_2^{-1}(B(0), C(0))_{2m \times 2m}$ соответствен-

но, ибо основные вычислительные операции связаны с нахождением этих обратных матриц.

Замечание 2. Если в центре аппроксимации t_0 матрица $D_1(B(0), C(0))$ или матрица $D_2(B(0), C(0))$ вырождаются, т. е. $\text{rang} D_1(B(0), C(0)) < 2n$ или $\text{rang} D_2(B(0), C(0)) < 2m$, то необходимо поменять t_0 так, чтобы имели место условия $\text{rang} D_1(B(0), C(0)) = 2n$ или $\text{rang} D_2(B(0), C(0)) = 2m$ и заново выполнить вычисления с самого начала.

Замечание 3. Очевидно, что матрицы

$$\begin{aligned}
 & D_1(B(l), B(K-l); C(l), C(K-l)), \forall l = 0, K \\
 & \text{и } D_2(B(l), B(K-l); C(l), C(K-l)), \forall l = 0, K
 \end{aligned}$$

являются блочными кососимметрическими относительно первой главной диагонали и блочными симметрическими относительно второй главной диагонали матрицами ввиду кососимметричности и симметричности соответственно их матриц-сомножителей.

Выводы

Предложены конструктивные декомпозиционные аналитические и численно-аналитические методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц, удовлетворяющие обобщенным условиям Мура–Пенроуза (1)–(4). Аналитические методы применимы к матрицам с меньшими размерами и простыми функциональными элементами. Численно-аналитические методы применимы всегда, естественно, при условиях аналитичности всех элементов функциональных матриц в центрах аппроксимации t_0 . Они легко реализуемы средствами современных информационных технологий [22–25].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беклемишев Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры. – М.: Наука, 1983. – 385 с.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Физматлит, 2010. – 560 с.
3. Светлаков А.А. Обобщенные обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 388 с.
4. Ben-Israel A., Greville T.N.E. Generalized Inverses: Theory and Applications. – NYC: Springer, 2003. – 435 p.
5. Campbell S.L., Meyer C.D. Generalized Inverses of Linear Transformations. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2008. – 232 p.
6. Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices and Singular Value Decomposition. – NYC: Springer, 2011. – 236 p.
7. Лоусон Ч., Хенсон П. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
8. Ганьшин В.Н. Псевдообращение матрицы нормальных уравнений свободных геодезических сетей // Известия вузов. Геодезия и аэрофотоосъемка. – 1989. – Вып. 6. – С. 3–5.
9. Губанов В.С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. – СПб.: Наука, 1997. – 319 с.
10. Капустин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. – СПб: Недра, 2002. – 424 с.
11. Михалевич И.М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием ком-

- пьютерных технологий: Statistica). – Иркутск: ИГУ, 2006. – Ч. 3. – 115 с.
12. Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. – 273 с.
13. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений. – Киев: Наукова думка, 1984. – 420 с.
14. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 158 с.
15. Пухов Г.Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т-преобразований. – Киев: Наукова думка, 1988. – 216 с.
16. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.
17. Симомян С.О., Аветисян А.Г. Прикладная теория дифференциальных преобразований. – Ереван: Чартарагет, 2010. – 361 с.
18. Симомян С.О. Матрично-векторные представления некоторых вычислительных методов определения параметрических обобщенных обратных матриц // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2013. – Т. 66. – № 4. – С. 370–378.
19. Симомян С.О. Определение квадратных параметрических обобщенных обратных матриц Мура–Пенроуза применением дифференциальных преобразований Пухова // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 323. – № 2. – С. 6–10.
20. Симомян С.О. Параллельные вычислительные методы определения параметрических обобщенных обратных матриц // Из-

- вестия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 10–15.
21. Симонян С.О., Асланян Г.А. Метод определения параметрических B, Q -обобщенно-обратных матриц // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2014. – Т. 67. – № 2. – С. 220–226.
 22. Метьюз Дж.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. – М.: Вильямс, 2001. – 713 с.
 23. Шлее М. Qt 4.8. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 912 с.
 24. Stroustrup B. The C++ Programming Language. 4th ed. – Boston: Addison – Wesley Professional, 2013. – 1368 p.
 25. The Math Works, Inc., MATLAB The language of technical programming Using MATLAB Graphics, Version 7.

Поступила 06.05.2014 г.

UDC 621.52+511.52

METHODS FOR DETERMINING COMPLEX ONE-PARAMETRIC GENERALIZED INVERSE MATRICES

Sargis H. Simonyan,

Dr. Sc., National Polytechnic University of Armenia (Polytechnic), 105, Teryan street, Yerevan, 0009, Armenia. Email: ssimonyan@seua.am

The relevance of the research is caused by the necessity of the efficient definition of complex one-parameter generalized inverse matrices of Moore and Penrouse, which are often used when solving various science and engineering problems, and for its special case, definition of real generalized inverse matrices which are widely used in different geo-informational systems.

The main aim of the research is to develop the constructive analytical and numeric-analytical methods of determining complex one-parameter generalized inverse matrices of Moore and Penrouse.

Methods of research. The author has applied the methods of linear algebra, methods of theory of matrices as well as the direct and reverse differential transformations of G.E. Pukhov, which differ from the well-known integral transformations in the fact that passing from the originals' domain to the domain of its representation is generally implemented on the basis of a more simple operation – differentiation (in comparison with the integration at integral transformations) and the reverse pass is implemented based on a simple operation – addition (in comparison with the integration at integral transformations).

Results. The author proposed the constructive analytical and numeric-analytical methods to determine complex one-parameter generalized inverse matrices of Moore and Penrouse. The analytical methods are based on the proposed decomposition matrix-pattern presentations, whereas numeric-analytical methods are based on joint use of these presentations and differential transformations. When the analytical methods are in practice applicable for small size matrices discussions and their simple analytical elements, then numeric-analytical methods are applicable for general case. On the other hand, actually the solution of the initial continuous problem brings to the solution of some recurrent chain of a series of discrete problems with numerical solutions (at the first stage of computations), and then to restoration of the continuous problem solution of the continuous problem on their basis (at the second stage of computations). The mentioned circumstances define the simplicity of realization of numeric-analytical methods by implementation of the modern means of information technologies.

Key words:

Geoinformatics, geoinformation technologies and systems, least squares method, complex one-parameter matrices, generalized inverse matrices, decomposition, matrix-pattern presentations, differential transformations, matrix discreets, matrix-pattern-column equivalent, matrix-pattern-row equivalent.

REFERENCES

1. Beklemishev D.V. *Dopolnitelnye glavy lineynoy algebry* [Additional Chapters of Linear Algebra]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 385 p.
2. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p.
3. Svetlakov A.A. *Obobshchennye obratnye matritsy: nekotorye voprosy teorii i primeneniya v zadachakh avtomatizatsii upravleniya protsessami* [Generalized inverse matrices: some issues of theory and application in problems of process control automation]. Tomsk, NTL Publ., 2003. 388 p.
4. Ben-Israel A., Greville T.N.E. *Generalized Inverses: Theory and Applications*. NYC, Springer, 2003. 435 p.
5. Campbell S.L., Meyer C.D. *Generalized Inverses of Linear Transformations*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2008. 232 p.
6. Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. *Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices and Singular Value Decomposition*. NYC, Springer, 2011. 236 p.
7. Louson C.H., Khenson P. *Chislennoye resheniye zadach metoda naimenshikh kvadratov* [Numerical solution of the least squares method]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 232 p.
8. Ganshin V.N. *Psevdoobrashhenye matritsy normalnykh uravneny svobodnykh geodezicheskikh setey* [Pseudo-inverse matrix of standard equations in free geodetic networks]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 1989, Iss. 6, pp. 3-5.
9. Gubanov V.S. *Obobshchenny metod naimenshikh kvadratov. Teoriya i primeneniye v astrometrii* [Generalized least square method. Theory and application in astrometry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1997. 319 p.
10. Kapustin Yu.E. *Gornye kompyuternye tekhnologii i geostatistika* [Mining computer technologies and geostatistics]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2002. 424 p.
11. Mikhalevich I.M. *Primeneniye matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoy informatsii (s ispolzovaniem kompyuternykh tekhnologii: Statistika)* [Application of mathematical methods when analyzing geological information (using computer technique: Statistika)]. Irkutsk, IGU Press, 2006. P. 3, 115 p.

12. Zhurkin I.G., Shaytura S.V. *Geoinformatsionnye sistemy* [Geoinformation systems]. Moscow, KUDIC-PRESS, 2009. 273 p.
13. Pukhov G.E. *Differentsialnye preobrazovaniya funktsy i uravneny* [Differential transformation of functions and equations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1984. 420 p.
14. Pukhov G.E. *Differentsialnye preobrazovaniya i matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov* [Differential transformation and mathematical modeling of physical processes]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 158 p.
15. Pukhov G.E. *Priblizhennyye metody matematicheskogo modelirovaniya, osnovannyye na primenenii differentsialnykh T-preobrazovaniy* [Approximate methods of mathematical modeling based on application of differential T-transformations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 216 p.
16. Pukhov G.E. *Differentsialnye spektry i modeli* [Differential spectra and model]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 184 p.
17. Simonyan S.O., Avetisyan A.G. *Prikladnaya teoriya differentsialnykh preobrazovaniy* [Applied theory of differential transformations]. Yerevan, Chartaraget Publ., 2010. 361 p.
18. Simonyan S.O. Matrichno-vektornyye predstavleniya nekotorykh vychislitelnykh metodov opredeleniya parametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits [Matrix-vector representation of some computational methods for determining parametric generalized inverse matrices]. *Izvestiya NAN RA i GIUA. Ser. TN*, 2013, vol. 66, no. 4, pp. 370–378.
19. Simonyan S.O. *Opredeleniye kvadratnykh parametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits Mura–Penrouza primeneniye differentsialnykh preobrazovaniy Pukhova* [Specifying square parametric generalized inverse matrices of Moore–Penrose using differential transformation of Pukhov]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 2, pp. 6–10.
20. Simonyan S.O. *Parallelnyye vychislitelnye metody opredeleniya parametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits* [Parallel computational methods for determining the parametric generalized inverse matrices]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 10–15.
21. Simonyan S.O., Aslanyan G.A. *Metod opredeleniya parametricheskikh B, Q-obobshchenno-obratnykh matrits* [The method of determining parametric B, Q-generalized inverse matrices]. *Izvestiya NAN RA i GIUA. Ser. TN*, 2014, vol. 67, no. 2, pp. 220–226.
22. Metyuz Dzh.G., Fank K.D. *Chislennyye metody. Ispolzovaniye MATLAB* [Numerical methods. Using MATLAB]. Moscow, Williams, 2001. 713 p.
23. Shleye M. Qt 9.8. *Professionalnoye programmirovaniye na C++* [Advanced Programming in C++]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg, 2012. 912 p.
24. Stroustrup B. *The C++ Programming Language. 4th ed.* Boston, Addison – Wesley Professional, 2013. 1368 p.
25. *The Math Works, Inc., MATLAB The language of technical programming Using MATLAB Graphics, Version 7.*

Received: 06 May 2014.

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*

Подписано к печати хх.хх.2015. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 19,08. Уч.-изд. л. 17,25.
Заказ хх-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