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 320, № 1, 2012

Науки о Земле

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ
г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Редакционный совет:

Чубик П.С. (председатель), д.т.н., ректор ТПУ (г. Томск)
Власов В.А. (зам. председателя), д.ф.-м.н., проректор ТПУ по НРиИ (г. Томск)
Алексеенко С.В., д.ф-м.н., чл.-корр. РАН (г. Новосибирск)
Болдырев В.В., д.х.н., академик РАН, (г. Новосибирск)
Боровиков Ю.С., к.т.н. (г. Томск)
Гвоздев Н.И., к.т.н. (г. Томск)
Гуляев Ю.В., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Дамамм Ж., д.н. (Франция)
Ершов Ю.Л., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Клименов В.А., д.т.н. (г. Томск)
Конторович А.Э., д.г.-м.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Крёнинг М., д.н. (Германия)
Кривобоков В.П., д.ф.-м.н. (г. Томск)
Летников Ф.А., д.г.-м.н., академик РАН (г. Иркутск)
Лопатин В.В., д.ф-м.н. (г. Томск)
Мазуров А.К., д.г.-м.н. (г. Томск)
Месяц Г.А., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Михайленко Б.Г., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН (г. Новосибирск)
Накоряков В.Е., д.т.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Панин В.Е., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Томск)
Сигов А.С., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Сигфуссон Т.И., д.н. (Исландия)
Сонькин М.А., к.т.н. (г. Томск)
Третьяков Ю.Д., д.х.н., академик РАН (г. Москва)
Турнаев В.И., д.и.н. (г. Томск)
Филиппов Г.А., д.т.н., академик РАН (г. Москва)
Шень Джаоли, д.н. (Китай)

Редакционная коллегия:

Власов В.А. (гл. редактор), д.ф.-м.н.
Коробейников А.Ф. (зам. гл. редактора), д.г.-м.н.
Могильницкий С.Б. (ученый секретарь), к.ф.-м.н.
Барышева Г.А., д.э.н.
Заворин А.С., д.т.н.
Григорьев В.П., д.ф.-м.н.
Корниенко А.А., д.ф.н.
Кривобоков В.П., д.ф.-м.н.
Лисицын В.М., д.ф.-м.н.
Погребной В.К., д.т.н.
Потылицын А.П., д.ф.-м.н.
Усов Ю.П., д.т.н.
Филимонов В.Д., д.х.н.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.
Учредитель: Томский политехнический университет

Издается с 1903 г.

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Editorial Board:

Chubik P.S. (Chairman), D.E., rector of TPU (Tomsk)
Vlasov V.A. (Deputy chairman), Phys. and Math. D. Sc., pro-rector of TPU for Research and Innovation (Tomsk)
Alekseenko S.V., Phys. and Math. D. Sc., corresponding member of RAS (Novosibirsk)
Boldyrev V.V., D. Chem., member of RAS (Novosibirsk)
Borovikov Yu.S., Candidate of Science (Tomsk)
Gvozdev N.I., Candidate of Science (Tomsk)
Gulyaev Yu.V., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Damamme G., Phys. and Math, D. Sc. (France)
Ershov Yu.L., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Novosibirsk)
Klimenov V.A., D.E. (Tomsk)
Kontorovich A.E., Geol. and Mineral. D. Sc., member of RAS (Novosibirsk)
Kröning M., Dr.h.c. (Germany)
Krivobokov V.P., Phys. and Math. D. Sc. (Tomsk)
Letnikov F.A., Geol. and Mineral. D. Sc., member of RAS (Irkutsk)
Lopatin V.V., Phys. and Math. D. Sc. (Tomsk)
Mazurov A.K., Geol. and Mineral. D. Sc. (Tomsk)
Mesyats G.A., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Mikhailenko B.G., Phys. and Math. D. Sc., corresponding member of RAS (Novosibirsk)
Nakoryakov V.E., D. E., member of RAS (Novosibirsk)
Panin V.E., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Tomsk)
Sigov A.S., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Sigfusson T.I., Ph. D. (Iseland)
Sonkin M.A., Candidate of Science (Tomsk)
Tretyakov Yu.D., D. Chem., member of RAS (Moscow)
Turnaev V.I., Ph. D. (Tomsk)
Filippov G.A., D.E., member of RAS (Moscow)
Shen Zhaoli, Ph. D. (China)

Editorial:

Vlasov V.A. (Editor in Chief), Phys. and Math. D. Sc.
Korobeinikov A.F. (Deputy Editor in Chief), Geol. and Mineral. D. Sc.
Mogilnitsky S.B. (Science Secretary), Candidate of Phys. and Math. Sc.
Barysheva G.A., Ec. D.
Zavorin A.S., D.E.
Grigoriev V.P., Phys. and Math. D. Sc.
Kornienko A.A., Ph. D.
Krivobokov V.P., Phys. and Math. D. Sc.
Lisitzyn V.M., Phys. and Math. D. Sc.
Pogrebnoy V.K., D.E.
Potylitzin A.P., Phys. and Math. D. Sc.
Usov Yu.P., D.E.
Filimonov V.D., D. Chem.

Подписной индекс по каталогу Агентства «Роспечать» – 18054

Журнал рассылается в адреса 50-и библиотек РФ, США, ФРГ, Великобритании, Франции и 9-и стран ближнего зарубежья

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах ТПУ: portal.tpu.ru/izvestiya/; ООО «Научная электронная библиотека»: www.elibrary.ru, www.e-library.ru, а также поисковой системы scholar.google.com

Импакт-фактор РИНЦ 0,121

© Tomsk Polytechnic University, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЯ

Использование древнего карста для палеогеографических реконструкций и анализа неотектонических движений 5
Гудымович С.С.

МИНЕРАЛОГИЯ

Неоднородность химического состава уролитов 11
Полиенко А.К., Поцелуев А.А., Ильенок С.С.

Оценка степени преобразования кварцитов методом инфракрасной спектроскопии 16
Коровкин М.В., Ананьева Л.Г., Анциферова А.А.

ГЕОЛОГИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Структурно-динамические режимы образования золото-сульфидно-кварцевой минерализации в Сюльбанской золоторудной зоне (бассейн среднего течения реки Витим). Ч. 2. Уряхское рудное поле 19
Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю.

Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма 28
Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхозин А.В.

Космоструктурные позиции золоторудных объектов заангарской части Енисейского кряжа 38
Ананьев Ю.С., Поцелуев А.А., Житков В.Г.

Геохимическая зональность золоторудного месторождения Кварцевая Гора (Енисейский кряж) 48
Ильин С.С., Макаров В.А.

Эндогенная рудно-метасоматическая зональность Майско-Лебедского золоторудного поля 55
Тимкин Т.В.

Геохронология и магматические источники щелочных пород и карбонатитов Южного Заангарья, Енисейский кряж 63
Врублевский В.В., Сазонов А.М., Гертнер И.Ф., Тишин П.А., Колмаков Ю.В.

Условия формирования девонских базальтов и долеритов Шира-Шунетского района Минусинского прогиба 71
Воронцов А.А., Федосеев Г.С.

Коры выветривания доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы 77
Ковешников А.Е., Недоливко Н.М.

Вторично-катагенетические преобразования доюрских пород Западно-Сибирской геосинеклизы 82
Ковешников А.Е., Недоливко Н.М.

ГЕОФИЗИКА

К методике оценки и геологической интерпретации анизотропии физических полей 87
Ерофеева Г.В., Ерофеев Л.Я.

Дискретные иерархические системы в геофизике 91
Устинова В.Н., Устинова И.Г.

Интерпретация данных высокоточной гравиразведки. Трехмерность объектов 98
Исаев В.И., Гуленок Р.Ю., Лобова Г.А.

Методы решения прямых задач гравиметрии 105
Пятаков Ю.В., Исаев В.И.

Магнитометрический прибор для обнаружения скрытых подземных объектов 111
Прищепов С.К., Власкин К.И.

ГЕОХИМИЯ

Распределение рения в формационных типах ультрамафитов Сибири 114
Коробейников А.Ф., Чернышов А.И.

ГЕОЛОГИЯ НЕФТИ И ГАЗА

Литолого-геофизическая характеристика юрских нефтегазоносных гравелитов, песчаников и алевролитов юго-востока Западно-Сибирской провинции 121
Ежова А.В.

Природа наклонных водонефтяных контактов верхнеюрских нефтяных залежей Каймысовского свода 130
Хромовских А.Ю.

CONTENTS

GENERAL GEOLOGY

The use of ancient karst for paleogeographic reconstructions and analysis of neotectonic movements 5
Gudymovich S.S.

MINERALOGY

Heterogeneity of urolith chemical composition 11
Polienko A.K., Potseluev A.A., Ilyenok S.S.

Evaluation of quartzite transformation degree by the infrared spectroscopy method 16
Korovkin M.V., Ananyeva L.G., Antsiferova A.A.

GEOLOGY AND MINERALS

Structural and dynamic regimes of forming gold-sulphide-quartz mineralization in Sulban gold-ore zone (Vitim mid-channel basin). P. 2. Urjah ore field 19
Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu.

Petrologic and geochemical features of wallrock metasomatism in Sukhoi Log gold field (Lenskiy region). P. 2 Petrology of wallrock metasomatism 28
Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V.

Cosmo-structural positions of gold deposits in over-Angara part of Yenisei ridge 38
Ananyev Yu.S., Potseluev A.A., Zhitkov V.G.

Geochemical zonality of gold deposit «quartz mountain» (Enisei ridge) 48
Ilyin S.S, Makarov V.A.

Endogenous ore-metasomatic zonality of Maysk-Lebedsk gold ore field 55
Timkin T.V.

Geochronometry and magmatic sources of alkaline rocks and carbonatites of southern over-Angara part, Yenisei Ridge 63
Vrublevskii V.V., Sazonov A.M., Gertner I.F., Tishin P.A., Kolmakov Yu.V.

The conditions for forming Devonian basalts and dolerites of Shira-Shunet region in Minusinsk trough 71
Vorontsov A.A., Fedoseev G.S.

Weathering rocks of pre-Jurassic rocks of Western-Siberian geosyneclise 77
Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M.

Secondary catagenetic transformations of pre-Jurassic rocks of Western-Siberian geosyneclise 82
Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M.

GEOPHYSICS

On the technique of estimation and geological interpretation of physical field anisotropy 87
Erofeeva G.V., Erofeev L.Ya.

Discrete hierarchical systems in geophysics 91
Ustinova V.N., Ustinova I.G.

Interpretation of high-precision gravity survey data. Three-dimensionality of objects 98
Isaev V.I., Gulenok R.Yu., Lobova G.A.

The techniques for solving the direct gravity problems 105
Pyatakov Yu.V., Isaev V.I.

Magnetometric device for detecting hidden subsurface objects 111
Prishchepov S.K., Vlaskin K.I.

GEOCHEMISTRY

Rhenium distribution in Siberian ultramafites mineragenic types 114
Korobeynikov A.F., Chernyshov A.I.

OIL AND GAS GEOLOGY

Lithological and geophysical characteristics of Jurassic oil and gas gravelites, sandstones and silt stones of south-east in Western-Siberian province 121
Ezhova A.V.

The nature of plunging oil-water contacts of upper-Jurassic oil accumulations in Kaymysov arch 130
Khromovskikh A.Yu.

Генезис нефтей месторождения Белый Тигр (Вьетнам) по данным о составе насыщенных ациклических углеводородов Серебренникова О.В., Ву Ван Хай, Савиных Ю.В., Красноярова Н.А.	**134**	**Oil genesis in «White Tiger» deposit (Vietnam) by the data on composition of saturated acyclic hydrocarbons** Serebrennikova O.V., Hai V.V., Savinykh Yu.V., Krasnoyarova N.A.
Учет деформационно-метасоматического преобразования нефтегазоносных залежей в процессе их разработки Гладков Е.А.	**138**	**The consideration of deformation-metasomatic conversion of oil and gas deposits at their development** Gladkov E.A.
Определение расчетных параметров для подсчета запасов на месторождениях нефти по результатам гидродинамических исследований скважин Захарова А.А., Крохалев И.В., Пешков В.Е., Пешков И.В., Паровинчак К.М., Синицин Е.А.	**142**	**Determination of the design data for estimating reserves on oil deposits by the results of hydrodynamic well investigations** Zakharova A.A., Krokhalev I.V., Peshkov V.E., Peshkov I.V., Parovinchak K.M., Sinitsyn E.A.
Оценка гидрогеодинамического влияния режима эксплуатации скважин на основе статистических функций Лукин Ал.А.	**146**	**Estimation of hydrodynamic impact of well operation conditions based on statistical functions** Lukin Al.A.
ГИДРОГЕОЛОГИЯ		**HYDROGEOLOGY**
Расчёт заторных уровней речных вод на юге Западной Сибири Савичев О.Г.	**152**	**Definition of ice jam levels of river waters in the south of the Western Siberia** Savichev O.G.
Вертикальная зональность и внутригодовые изменения химического состава вод Тимирязевского болота (Томск, Западная Сибирь) Савичев О.Г., Шмаков А.В.	**156**	**Vertical profile and annual changes of chemical composition in waters of the Timiryazevo mezotrophic marsh (Tomsk, the Western Siberia)** Savichev O.G., Shmakov A.V.
ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ		**EXPLORATION TECHNIQUE**
Повышение фондоотдачи самоходного оборудования при многозабойной проходке разветвленных систем подземных горизонтальных горных выработок Лукьянов В.Г., Панкратов А.В.	**162**	**Increasing capital productivity of self-powered equipment at multi-hole penetration of subsurface level branched systems** Lukyanov V.G., Pankratov A.V.
Лабораторный стенд для определения перемещений грунта, возникающих в процессе прокладки бестраншейного трубопровода Поварницын С.В., Рудаченко А.В.	**166**	**The laboratory bench for determining earth moving occurring at pipe driving** Povarnitsyn S.V., Rudachenko A.V.
ГЕОЭКОЛОГИЯ		**GEOECOLOGY**
Уровни накопления и характер распределения лантаноидов и трансурановых элементов в вертикальном разрезе пойменных почв протоки Чернильщиково р. Томи Берчук В.Ю., Рихванов Л.П., Готье-Ляфай Ф.	**170**	**Accumulation levels and distribution character of lanthanides and transuranium elements in a vertical section of floodplain soils in Chernilschikovo arm (the Tom river)** Berchuk V.Yu., Rikhvanov L.P., Gotye-Lyafay F.
Кондиционирование низко- и среднерадиоактивных отходов с учетом защиты цементных компаундов от микробиологической деструкции Горбунова О.А., Винокуров С.Е.	**178**	**Conditioning of low-and medium radioactive waste considering cement compound protection from microbial corrosion** Gorbunova O.A., Vinokurov S.E.
Инженерно-экологические особенности вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых ядерных реакторов и исследовательских ядерных установок Хвостова М.С.	**184**	**Engineering and ecological features of decommissioning the industrial uranium-graphite nuclear reactors and nuclear research facilities** Khvostova M.S.
Изучение поступления тяжелых металлов в компоненты окружающей природной среды, на примере Хинганского месторождения оловянных руд Еврейской АО Горюхин М.В.	**189**	**The research of heavy metal input to environmental components by the example of Khingansk tin ore deposit in Jewish Autonomous Region** Goryukhin M.V.
Состав и особенности изменения со временем водорастворимого комплекса органических веществ нефтезагрязненной водной среды Кульков М.Г., Коржов Ю.В., Артамонов В.Ю., Углев В.В.	**193**	**Structure and features of changing in time of organic substance water-soluble complex in oil polluted water environment** Kulkov M.G., Korzhov Yu.V., Artamonov V.Yu., Uglev V.V.
СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ ТПУ		**PAGES OF HISTORY OF TPU**
Михаил Эрастович Янишевский – основатель кафедры палеонтологии в Томском технологическом институте Рычкова И.В., Рябчикова Э.Д.	**200**	**Mikhail Erastovich Janishevsky – the founder of the department of paleontology at Tomsk technological institute** Rychkova I.V., Ryabchikova E.D.
Развитие научных исследований по биоминералогии и урологии в Томском политехническом университете Полиенко А.К., Севостьянова О.А.	**206**	**The development of the researches in biomineralogy and urology at Tomsk polytechnic university** Polienko A.K., Sevostyanova O.A.
НАШИ ЮБИЛЯРЫ		**ANNIVERSARIES**
Профессору С.Л. Шварцеву – 75 лет	**212**	**Professor S.L. Shvartsev is 75**
Профессору И.В. Гончарову – 65 лет	**214**	**Professor I.V. Goncharov is 65**
НЕКРОЛОГ		**NECROLOGY**
Профессор С.С. Сулакшин (1919–2011)	**216**	**Professor S.S. Sulakshin (1919–2011)**
РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ	**218**	**SUMMARIES**
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	**222**	**INFORMATION ABOUT AUTHOR**

Общая геология

УДК 551.248.2:551.435.8(1–925.15)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРЕВНЕГО КАРСТА ДЛЯ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ И АНАЛИЗА НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

С.С. Гудымович

Томский политехнический университет
E-mail: gudss@tpu.ru

Описан новый участок развития древнего покрытого карста междуречий в Батеневском кряже Минусинской котловины. Предложено использовать мощность инфлювия такого карста в качестве относительных отметок донеотектонического рельефа при палеогеографических реконструкциях, а разницу между абсолютными отметками подошвы инфлювия и тальвегов современной эрозионной сети – за амплитуду неотектонического воздымания.

Ключевые слова:
Батеневский кряж, покрытый карст, инфлювий, палеогеографическая реконструкция, амплитуда неотектонического воздымания.

Key words:
Batenevsky range, covered karst, the influvium, palaeogeografical reconstraction, amplitude of neotectonical uplift.

Центральная часть восточного склона Кузнецкого Алатау и примыкающий к нему Батеневский кряж – известные районы развития карста в карбонатных толщах верхнего рифея и нижнего кембрия. Сошлемся на спелеологическую «Мекку» Западной Сибири – район пос. Малая Сыя на р. Белый Июс.

Характеристика карста указанных районов дана в многочисленных публикациях Р.А. Цыкина. Автором этой статьи в последние годы получены данные, дополняющие эти всесторонние описания.

В пределах Батеневского кряжа выявлен новый участок развития древнего покрытого карста, наращивающий к северо-западу Батеневский карстовый район, описанный Р.А. Цыкиным [1. С. 39–41].

Участок площадью 12×4 км, вытянутый на северо-восток, располагается в 12...14 км к югу и юго-востоку от курорта Шира (рис. 1). В геологическом отношении он приурочен к северо-западному склону Батеневского антиклинория салаирского возраста на границе последнего с площадью распространения девонских отложений, слагающих краевую часть герцинской Чебаково-Балахчинской котловины, и сложен мраморизованными известняками и доломитами с прослоями вулканогенно-терригенных пород сыннигской, тюримской, арамонской и таржульской свит среднего рифея – венда, смятыми в складки северо-восточного простирания и разбитыми дизъюнктивами.



Рис. 1. *Схема расположения участка с древним карстом (заштриховано в клеточку)*

В геоморфологическом отношении участок состоит из двух типичных для средневысотного холмистого (сопочного) денудационного рельефа Хакасии островных массивов (возвышенностей) – массива г. Волчьей и расположенного юго-западнее массива г. Метелкина (рис. 2).

Островные массивы заметно возвышаются над окружающей с севера территорией распространения девонских отложений. В этом сказалась не только большая амплитуда неотектонического поднятия Батеневского кряжа относительно Чебаково-Балахчинской котловины, но и особенность денудации в условиях засушливого климата Хакасии: карбонатные толщи зачастую денудируются

медленнее, чем магматические породы. Особенно это заметно в восточной части участка, где карбонатные толщи массива г. Волчьей окружены полями распространения девонских эффузивов.

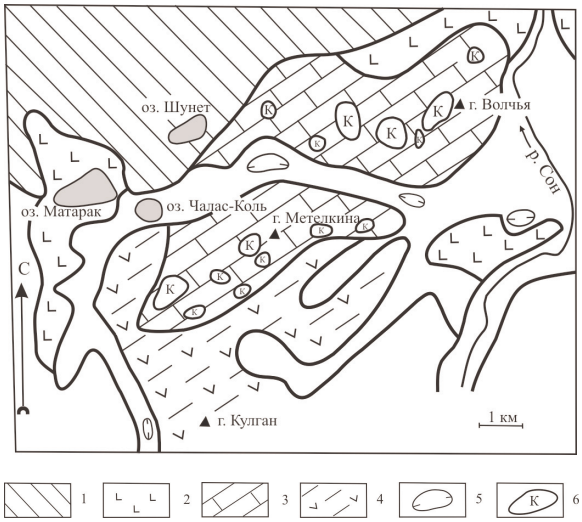


Рис. 2. *Геолого-геоморфологическая схема расположения карста на участке г. Метелкина – г. Волчья: 1) куэстовый рельеф на нижне-среднедевонских осадочных горных породах; 2) мелкосопочно-равнинный рельеф на нижнедевонских эффузивах; 3) средне- и высокохолмистый рельеф на карбонатных толщах рифея-нижнего кембрия; 4) то же на эффузивно-терригенных толщах рифея; 5) котловины; 6) участки проявления древнего карста*

Более подробно изученная островная возвышенность г. Волчьей ограничена со всех сторон типичными для этого рельефа широкими линейными депрессиями, изначально представляющими собой цепочки дефляционных (а на карбонатных породах возможно и карстовых) котловин, позже переработанных временными водотоками в сухие лога с открытими верховьями и педиментными проходами из лога в лог. В позднеплейстоценовое – голоценовое время эти лога местами были освоены современной речной сетью (р. Сон) или заняты озерами в наиболее низких местах.

Абсолютные отметки водораздельного пространства островной возвышенности составляют, в среднем, 560 м, относительные превышения над днищами окружающих сухих логов и долиной р. Сон колеблются от 50 до 100 м. Гора Волчья с её абсолютной отметкой 602,8 м резко возвышается над водораздельным пространством и воспринимается как монаднок, хотя она сложена теми же карбонатными породами, что и остальная территория возвышенности.

Внутреннее геоморфологическое строение островной возвышенности типично для денудационного аструктурного холмистого рельефа Хакасии (рис. 3 и 4, А). Максимальные отметки водораздельно пространства принадлежат небольшим извилистым грядам длиной до 2...2,5 км и шириной 300...800 м, расположенным, в общем, беспорядочно вне какой-либо внятной связи с геологическим строением. Склоны гряд голые, делювиально-гравитационного сноса, крутизной до 25°. Основная часть площади водораздельного пространства и склоны островной возвышенности заняты более широкими полузакрытыми склонами гравитационно-делювиального транзита с уклоном 5...10°, в нижней части переходящими в наиболее пологие задернованные склоны-педименты делювиального накопления и делювиально-пролювиальный шлейф, включающий конусы выноса из логов и тянущийся вдоль подножий островной возвышенности. Таким образом, общий профиль склонов островной возвышенности вогнутый – типичный результат развития склонов в аридном и полуаридном климате (рис. 4, Б).

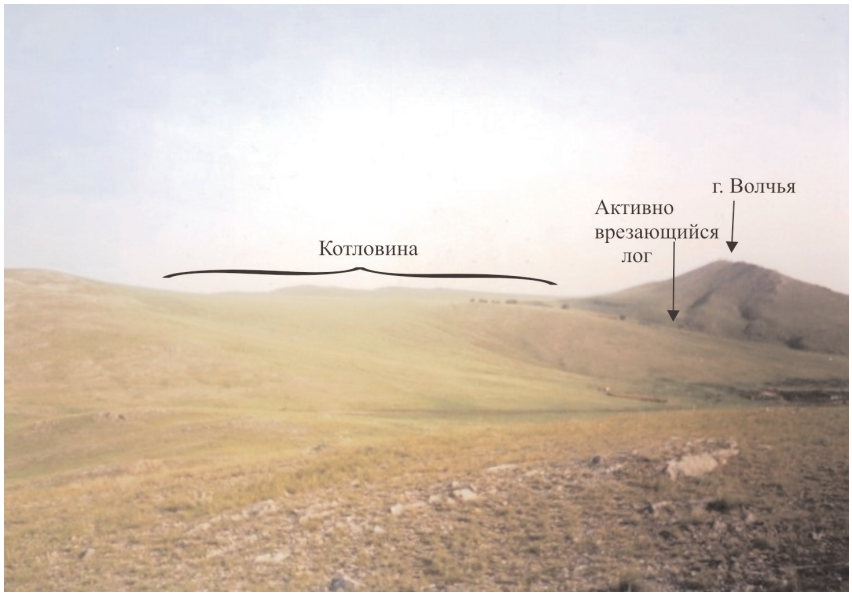


Рис. 3. *Панорама котловины западнее г. Волчьей. Вид с юга*

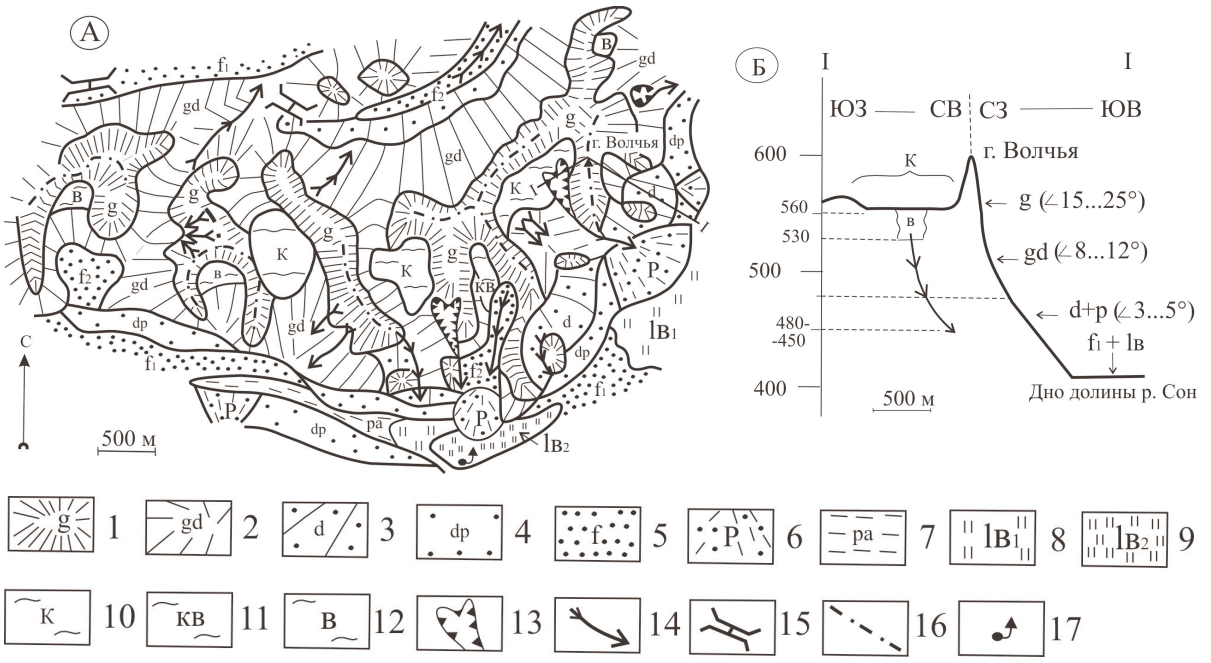


Рис. 4. *А – геоморфологическая карта г. Волчья; Б – схематический профиль рельефа по линии I – I; склоны: 1) делювиально-гравитационного сноса; 2) гравитационно-делювиального транзита; 3) делювиального транзита и накопления (педименты); 4) делювиально-пролювиальные шлейфы; флювиальный рельеф: 5) днища сухих логов, выполненные маломощным пролювием, f1 – разделяющих островные возвышенности, f2 – второстепенных; 6) пролювиальные конусы выноса; 7) днища зачаточных долин с пролювиально-аллювиальным заполнением; озерно-болотные равнины: 8) более древние, менее увлажненные; 9) современные, обводненные; проявления древнего карста: 10) котловины; 11) карстовые понижения, освоенные верховьями сухих логов; 12) воронки; прочие формы рельефа: 13) резко врезанные активные эрозионные рытвины и лога; 14 – те же, не выражающиеся в масштабе; 15) аномально низкие седловины (открытые верховья, педиментные проходы); 16) водораздельные гребни; 17) выходы подземных вод*

Местами в нижнюю часть склонов с плавными переходами врезаны широкие древние сухие лога с разложистым U-образным поперечным профилем и плоским дном за счёт заполнения пролювием.

Современная эрозионная сеть в пределах островной возвышенности представлена врезанными эрозионными рытвинами и сухими логами с крутосклонными V-образными поперечными профилями и закрытыми верховьями, продолжающими энергично врезаться. Эти рытвины и лога или наследуют тальвеги более древних широких сухих логов или развиваются по лощинам склонов.

В пределах обеих островных возвышенностей дешифрированием аэрофотоснимков и наземным обследованием выявлено 14 форм проявления древнего карста изометричных или слегка вытянутых в плане размером от 100...200 м до 1 км, расположенных в беспорядке на расстоянии, в среднем, около 0,5 км друг от друга (рис. 2). Суммарная площадь этих форм составляет около 15 % от площади всего участка. Наложение карстовых форм на геологическую карту не выявило никакой закономерности или связи их с деталями геологического строения островных возвышенностей, кроме само собой разумеющейся приуроченности к карбонатным толщам, хотя такие закономерности существуют, но для выявления их требуются более детальные исследования.

Все карстовые формы, за одним исключением, находятся в пределах водораздельных пространств островных возвышенностей. На возвышенности г. Волчьей три наиболее крупные карстовые формы находятся в её осевой части и, на первый взгляд, воспринимаются просто как наиболее уплощённые участки водораздельной поверхности.

По размерам, строению и взаимоотношениям с другими элементами рельефа все выявленные карстовые формы можно разделить на следующие виды.

Воронки («в» на рис. 4) – замкнутые, более менее округлые в плане понижения диаметром не более 200...300 м и глубиной относительно окружающего рельефа до первых десятков м с относительно более крутыми склонами.

Котловины («к» на рис. 4) – округлые или слегка вытянутые в плане, размером до 1 км, глубиной относительно окружающего рельефа до нескольких десятков м, с явным, в общем, плоским дном, имеющим, однако, слабый уклон к центру.

Котловины-верховья («кв» на рис. 4) – те же котловины, освоенные верховьями широких сухих логов. Морфологически это амфитеатры с плоским дном, открывающиеся через слабо выраженный порожек в вершинах древних сухих логов.

Суходолы (южнорусское название «суходол» для обозначения таких форм впервые применил Р.А. Цыкин [2. С. 29]) – серии из двух-трех небольших, диаметром не более 100 м котловин, объединённых эрозионно-пролювиальным процессом в сухой лог. Продольные профили таких логов (например, лог, выходящий из крайней к западу карстовой котловины островной возвышенности г. Метелкиной) всегда волнистые, вплоть до обратных уклонов на нижних краях котловин.

Склоны и днища всех карстовых форм задернованные.

Важным является вопрос о глубине выявленных карстовых форм. В решении этого вопроса природа предоставила нам уникальный объект. Непосредственно западнее г. Волчья на водораздельной поверхности находится карстовая котловина, вытянутая в северо-западном направлении длиной 1 км и шириной до 400 м (рис. 4). Дно котловины практически ровное, поделено невысоким – не более 2...3 м (а потому невидимым на аэрофотоснимке) увалом, сложенным коренными мраморизованными известняками, на две котловины, каждая из которых представляет собой самостоятельную карстовую котловину.

В склон, примыкающий с юга к восточной котловине, врезан молодой активно развивающийся ложок. Снизу ложок начинается еще на вершине крупного конуса выноса, его нижняя часть в пределах более полого делювиального склона-педимента представляет собой обычную эрозионную рытвину глубиной до 2 м. Но от подножия более крутого склона делювиально-гравитационного сноса лог резко расширяется, углубляется и заканчивается двумя вершинами глубиной до нескольких метров с вертикальными стенками, резко врезанными в днище котловины.

Стенки расширенной части лога и останец между двумя его вершинами сложены рыхлым светло-серым супесчаным материалом, переполненным дресвой и мелкой щебёнкой черных силицитов, ороговикованных алевролитов и песчаников, окремненных известняков и лилово-фиолетовых и буровато-красных эффузивов. Текстура породы беспорядочная, хотя местами намечается субгоризонтальное залегание уплощённой щебенки. Очевидно, что накопление этих щебенисто-дресвяных супесей шло параллельно с образованием самой карстовой формы в результате сочетания элювиального, коллювиального и делювиального процессов. Источником обломочного материала, очевидно, служили эффузивно-терригенные пачки среди преобладающих карстующихся карбонатных пород.

Мощность описанной рыхлой толщи составляет 30 м. Резкое расширение и углубление лога связано с тем, что он нащупал эту рыхлую, легко размываемую толщу. Опираясь на максимальную ширину верхней части лога, диаметр тела рыхлой толщи можно оценить в 200 м.

Таким образом, в описанном случае мы имеем поверхностную задернованную карстовую котловину, дно которой осложнено дополнительным углублением – воронкой меньшего размера (200...300 м), полностью заполненной карстовыми отложениями. По Р.А. Цыкину этот карст относится к покрытому карсту междуречий, представленному котловинообразными карстовыми седиментационными коллекторами, выполненными инфлювием [1. С. 7].

Уместно подчеркнуть, что автор данной статьи для обозначения карстовых форм употребил традиционные термины – «воронка», «котловина» и считает излишней предлагаемую Р.А. Цыкиным для покрытого карста терминологию «воронкообразные», «котловинообразные» и т. п. карстовые седиментационные коллекторы.

Формирование водораздельного покрытого карста и его заполнение продуктами коры выветривания Р.А. Цыкин считает одновременным с формированием самой доорогенной коры и датирует эти процессы возрастом от юры до миоцена [2. С. 125], т. е. заведомо донеотектоническими, что подтверждается и нашими данными [3].

В связи с вышесказанным интересен вопрос о возможности использования морфометрических показателей этого карста, *во-первых*, для палеогеографической реконструкции рельефа эпохи формирования коры выветривания и, *во-вторых*, в качестве еще одного критерия для определения амплитуд неотектонических поднятий.

Наиболее объективной методикой определения амплитуд неотектонических поднятий эпиплатформенных гор, к которым относится и описываемый район, является морфометрический анализ вершинной поверхности, с помощью которого автором была составлена схема неотектоники региона [4].

Достоверные результаты с помощью этой методики могут быть получены при двух условиях: на водораздельных пространствах, по абсолютные отметкам которых строится вершинная поверхность, сохранилась доорогенная кора выветривания и известны абсолютные отметки исходного доорогенного рельефа. Но, как правило, эта кора «сдёрнута» синорогенной денудацией, а абсолютные отметки исходного рельефа неизвестны. Использование морфолого-морфометрических характеристик покрытого водораздельного карста позволяет уточнить как абсолютные и относительные отметки исходного рельефа, так и амплитуды последующих неотектонических движений.

Осевая водораздельная часть островной возвышенности г. Волчьей вместе с расположенными в её пределах карстовыми котловинами воспринимается как реликт поверхности донеотектонического рельефа, существовавшего до развития системы основных сухих логов, разделяющих островные возвышенности.

Мощность инфлювия в карстовой воронке у г. Волчьей составляет, как указано выше, 30 м. Замечательно, что на расположенном в 100 км к западу полигенном инфлювиально-карстовом золото-

рассыпном месторождении «Перевальный» на западном склоне Знаменитинских гольцов в Кузнецком Алатау, где абсолютные отметки рельефа около 800 м, мощность красноцветного золотоносного инфлювия также составляет 30 м [3]. Наконец, на Обладжанском месторождении фосфоритов, расположенном в Батеневском кряже в 35 км к юго-юго-востоку от г. Волчьей, где абсолютные отметки достигают 1000 м, а относительные превышения водоразделов над днищами эрозионных форм – 300...400 м, преобладающие цифры мощности инфлювия – те же 25...30 м [5].

По общей схеме водораздельный карст, представленный воронками и котловинами, развивается вертикально до зеркала грунтовых вод, которое в свою очередь, понижаясь в сторону эрозионной сети, приближается к её тальвегам или совпадает с последними, образуя нисходящие источники.

Автор считает, что если *к мощности инфлювия добавить превышения зеркала грунтовых вод над тальвегами эрозионной сети*, *то получатся превышения водораздельных пространств над эрозионной сетью – относительные отметки рельефа времени формирования карста*. В нашем случае к указанным 30 м мощности инфлювия добавляем 10...20 м (условные цифры, совпадающие, однако, со средними значениями для возвышенных равнин и холмистых рельефов) превышения зеркала грунтовых вод в пределах водоразделов над тальвегами эрозионной сети и получаем относительные отметки рельефа. Таким образом, площадь, охватывающая указанные участки, размером 100×35 км в период формирования закрытого карста представляла собой денудационную равнину или холмистый рельеф с глубиной эрозионного расчленения не более 40...50 м. В современном рельефе Западной Сибири территории с такими относительными отметками представляют собой равнины и холмистые рельефы с абсолютными отметками, не превышающими 300, максимум 400 м.

На этом основании с достаточной долей вероятности можно предположить, что и исходный донеотектонический (доорогенный) рельеф имел тот же характер с теми же абс. отметками. Наличие на некоторых участках мощностей инфлювия, существенно превышающих принятые за опорные 30 м, например, на Обладжанском месторождении – до 150 м, свидетельствуют о наличии в исходном доорогенном равнинно-холмистом рельефе локальных останцовых возвышенностей или о формировании ниже базисов эрозии глубинного подземного карста, обусловленного циркуляцией не только грунтовых, но и глубже залегающих подземных вод.

Амплитуда неотектонического воздымания исходного рельефа при использовании данных по заполненному инфлювием закрытому карсту междуречий *определяется как разница между абсолютными отметками тальвегов эрозионной сети донеотектонического и современного рельефов*.

На участке г. Волчьей (рис. 5) первая цифра складывается из 530 м – абсолютная отметка подошвы рыхлой толщи в карстовой воронке минус 10...20 м понижения уровня грунтовых вод к ближайшему тальвегу (см. выше) и составляет, таким образом, 510...520 м. Абсолютная отметка днища современной долины р. Сон – 400 м. Следовательно, амплитуда неотектонического воздымания этого участка получается 510...520–400=110...120 м. Аналогичным образом посчитанные амплитуды неотектонического поднятия участка «Перевальный» – 180...200 м, а на Обладжанском месторождении – 250...310 м.

Сложнее обстоит дело с определением амплитуд неотектонического воздымания в горной части района с глубоким открытым («голым» по А.Р. Цыкину) пещерным карстом. Доорогенная кора выветривания на таких участках, очевидно, была сденудирована в начале процесса орогенеза. Карст, особенно развитый в придолинных частях склонов водоразделов, закладывался в разное время, точки его заложения опускались по рельефу по мере воздымания гор и, соответственно, врезания эрозионной сети и привязанного к этому процессу понижения зеркала грунтовых вод, карст все время хорошо промывался и не консервировался инфлювием. Например, на Ефремкинском участке Июсского карстового района (у пос. Малая Сыя) известно несколько карстовых пещер, устья которых расположены на абсолютных отметках от 850...900 (пещера «Крест») до 700 м (пещера «Ящик Пандоры») с глубиной, соответственно, 80 и 182 м. Но и в этом случае, как считает автор, амплитуда неотектонического поднятия будет равна, как минимум, разнице в абсолютных отметках нижней границы зоны красноцветной кольматации (синхронной донеотектоническому этапу формирования коры выветривания) в верхних вертикальных частях самых высоких пещер и уреза воды в р. Белый Июс. Если принять мощность зоны кольматации, равной принятым выше 30 м, то для наиболее высоко расположенной пещеры «Крест» амплитуда неотектонического поднятия составит не менее 300 м.

Из сравнения результатов определения амплитуд неотектонических поднятий, полученных по методике морфометрического анализа вершинной поверхности, и только что изложенной методике с использованием данных по закрытому водораздельному карсту, видно следующее.

Во-первых, указанные опорные цифры абсолютных отметок и относительных превышений, предполагаемые для исходного донеотектонического рельефа по методике с использованием закрытого водораздельного карста, получились те же или даже несколько меньше, что и аналогичные цифры для опорных стабильных блоков-реперов с нулевой амплитудой неотектонического поднятия, относительно которых определялись амплитуды неотектонических поднятий в Кузнецком Алатау и Батеневском кряже при анализе вершинной поверх-

ности. Таким образом, исходный донеотектонический рельеф, охарактеризованный по обеим методикам, получается один и тот же.

Во-вторых, заметим, что цифры амплитуд неотектонического поднятия, полученные по методике морфометрического анализа вершинной поверхности – 150 м для участка г. Волчьей, 400 м для участков «Перевальный» и «Ефремкинский» – несколько больше, чем полученные путем анализа покрытого карста, но вполне сопоставимые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыкин Р.А., Цыкина Ж.Л. Карст восточной части Алтае-Саянской складчатой области. – Новосибирск: Наука, 1978. – 104 с.
2. Цыкин Р.А. Отложения и полезные ископаемые карста. – Новосибирск: Наука, 1985. – 166 с.
3. Васильев Б.Д., Гудымович С.С., Кныш С.К. Карстовые россыпи Знаменитинского района // Проблемы геологии Сибири / под ред. А.И. Гончаренко. – Т. 2. – Томск: Изд-во ТГУ, 1996. – С. 96–97.
4. Геология и минерагения Северной Хакасии / под ред. В.П. Парначева и Б.Д. Васильева. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 115–120.
5. Мкртчян А.К., Цыкин Р.А. О фосфоритах Обладжанского месторождения // Закономерности размещения главнейших осадочных полезных ископаемых Сибири. Фосфатное сырье: Труды СНИИГГИМС. – 1968. – Вып. 68. – С. 147–156.

Поступила 27.06.2011 г.

Минералогия

УДК 549.11+611.466.1

НЕОДНОРОДНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА УРОЛИТОВ

А.К. Полиенко, А.А. Поцелуев, С.С. Ильенок

Томский политехнический университет
E-mail: polienkoa@yandex.ru

Изучено распределение химических элементов в структуре уролитов. Получены данные по распределению отдельных элементов и их соотношению в точках на профиле и в плоскости среза (шлифа). Установлено, что неоднородность в распределении элементов в структуре связана с особенностями зон роста уролитов. Это зафиксировано на границах, разделяющих минеральную и органическую компоненты уролитов. Установлено, что отдельные химические элементы встречаются во многих точках наблюдения, в то же время другие элементы наблюдаются довольно редко.

Ключевые слова:
Структура уролитов, элементный состав, распространение элементов.

Key words:
Structure of urolithes, element structure, distribution of elements.

Введение

В последние два десятилетия повысился интерес исследователей к изучению патогенных биоминеральных образований в организме человека. Одними из таких образований являются уролиты, формирующиеся в мочевыделительной системе. Заслуживает пристального внимания характер распределения химических элементов в структуре уролитов. Изучение химического и биохимического состава уролитов, а также структурных особенностей их ритмической зональности отмечено в ряде работ [1–5]. Полученная информация имеет большое значение для понимания онтогении уролитов.

Материалы и методы исследования

Задачей исследования является изучение распределения отдельных химических элементов в структуре уролита, которая представлена чётко выраженным ядром и несколькими зонами. Каждая зона отделена от соседней тончайшим слоем, состоящим из органического вещества и имеющим тёмную окраску.

Актуальность данной проблемы диктуется необходимостью детального исследования химического состава уролитов с целью получения новых данных, которые могут более глубже понять механизм зарождения, развития и изменений, происходящих в уролитах.

Для выполнения поставленной задачи в качестве объекта исследований использован уролит, полученный в результате удаления камня из почки в урологическом отделении городской больницы № 3 (пациент 70 лет). Изучение уролита проведено по комплексной методике, которая предполагает несколько этапов исследования. Вначале на бинокулярном микроскопе изучена морфология поверхности, определён минеральный состав, текстурно-структурные особенности уролита, а затем был изготовлен шлиф. В шлифе исследован минеральный состав уролита и характер взаимоотношений между зёрнами. Следующий этап исследований заключался в изучении распределения химических элементов в структуре уролита. Эта работа была выполнена с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой (ЭДС) Bruker XFlash 4010 для проведения рентгеноспектрального анализа. Микроскоп располагается в учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики МИНОЦ кафедры геоэкологии и геохимии (ГЭГХ) Института природных ресурсов ТПУ (оператор С.С. Ильенок). Съёмка (исследование) шлифа производилась в режиме обратно рассеянных электронов при давлении порядка 30...40 Па.

При исследовании шлифа уролита были использованы следующие возможности сканирую-

щего электронного микроскопа HITACHI S-3400N:

- определение наличия и содержания химических элементов в точках по профилю (линии);
- изучение распределения химических элементов по площади (в плоскости среза исследуемого объекта);
- представление информации в виде графического материала (содержание элементов) и фотографий (карты распределения элементов).

Исследования с использованием названного выше оборудования выполнены впервые с получением научных данных, позволяющих сделать важные выводы о распределении отдельных химических элементов в структуре уролитов.

Основные результаты исследований и их обсуждение

Изучен шлиф уролита Ch-1-2 с известным минеральным составом (оксалатно-фосфатным). Ядро уролита представлено сгустком органики, в которую погружены кристаллы одноводного оксалата кальция $CaC_2O_4 \cdot H_2O$ (минерал – уэвеллит).

В шлифе исследовано 20 точек, в каждой из которых в массовых процентах определено содержание химических элементов (табл. 1). Получена информация о распределении отдельных элементов и их соотношении как в точках на профиле, так и в плоскости среза (шлифа).

Изучено содержание элементов в отдельных точках шлифа, по каждому элементу выявлены минимальные и максимальные величины их содержания.

Таблица 1. *Содержание химических элементов (мас. %) в шлифе уролита (наблюдения по 20 точкам)*

Элемент/частота встречаемости	Min/Max
O/15	16,3/59,2
Na/15	*/10,8
Ca/15	*/32,8
C/14	2,5/18,4
Si/14	*/28,6
S/13	*/40,2
K/13	*/2,2
P/12	*/12,3
N/10	8,7/30,9
Mg/8	*/9,9
Fe/3	*/59,8
Ba/2	*/23,0
Zn/2	*/40,4
As/2	*/69,1
Sb/1	*/70,8
Pb/1	*/75,2
Ni/1	*/49,3

**Ниже предела обнаружения.*

Из анализа табл. 1 следует, что 9 химических элементов выявлены в достаточно большом количестве точек (от 10 до 15 из 20 точек наблюдения). К таким элементам относятся: O, Na, Ca, C, Si, S, K, P, N. Остальные элементы встречены в меньшем количестве точек. Так, Mg и Al отмечены в 8 точках; Cl – в 7 точках; Fe – в 3 точках; Ba, Zn, As – в 2 точках; Pb и Ni – по одной точке.

В отдельных точках шлифа определены соединения: $BaSO_4$, FeS_2, ZnS.

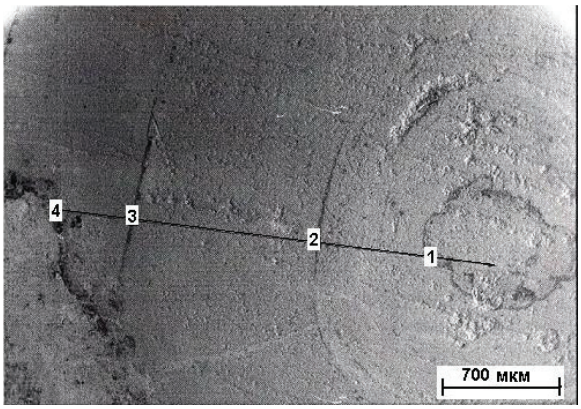


Рис. 1. *Расположение точек исследования на профиле в шлифе уролита (от периферии – т. 4 к ядру уролита – т. 1)*

В шлифе (рис. 1) отчётливо видна линия границы ядра (в т. 1 по профилю) и две границы между зонами (тт. 2 и 3). В этих точках, а также в т. 4 отмечено повышенное содержание органического материала.

В изученном уролите отмечено чередование комплексных по химическому составу и значительных по мощности зон роста (мощностью от 20 до 40 мкм) с маломощными (от 5 до 10 мкм) зонами, преимущественно кальциевого состава. Содержание этого основного образующего элемента в маломощных зонах возрастает до 20...30 %. При этом значительно снижается содержание углерода (до 2,5...5,3 %) и азота (до 9...11 %).

В строении уролитов отчётливо выделяются зоны. В пределах одной зоны рост уролита обусловлен, главным образом, формированием оксалатных соединений. На сформировавшемся агрегате оксалатного состава в дальнейшем может происходить отложение карбоната кальция. Формирование следующей зоны вновь начинается с активного отложения оксалатов.

По выбранному профилю (рис. 2) показаны 5 элементов, составляющих основу химического и минерального состава уролита: углерод, кислород, кальций, фосфор, азот.

При изучении распределения химических элементов по профилю шлифа установлено наличие четырёх чётко выраженных пиков, соответствующих точкам наибольшей концентрации ионов кальция. Эти точки (1–4 на профиле) расположены на границах, разделяющих структурные зоны уролита. Границы между зонами представлены органическим веществом, которое расположено на поверхности слоя, сложенного минеральным веществом. В органической массе содержится

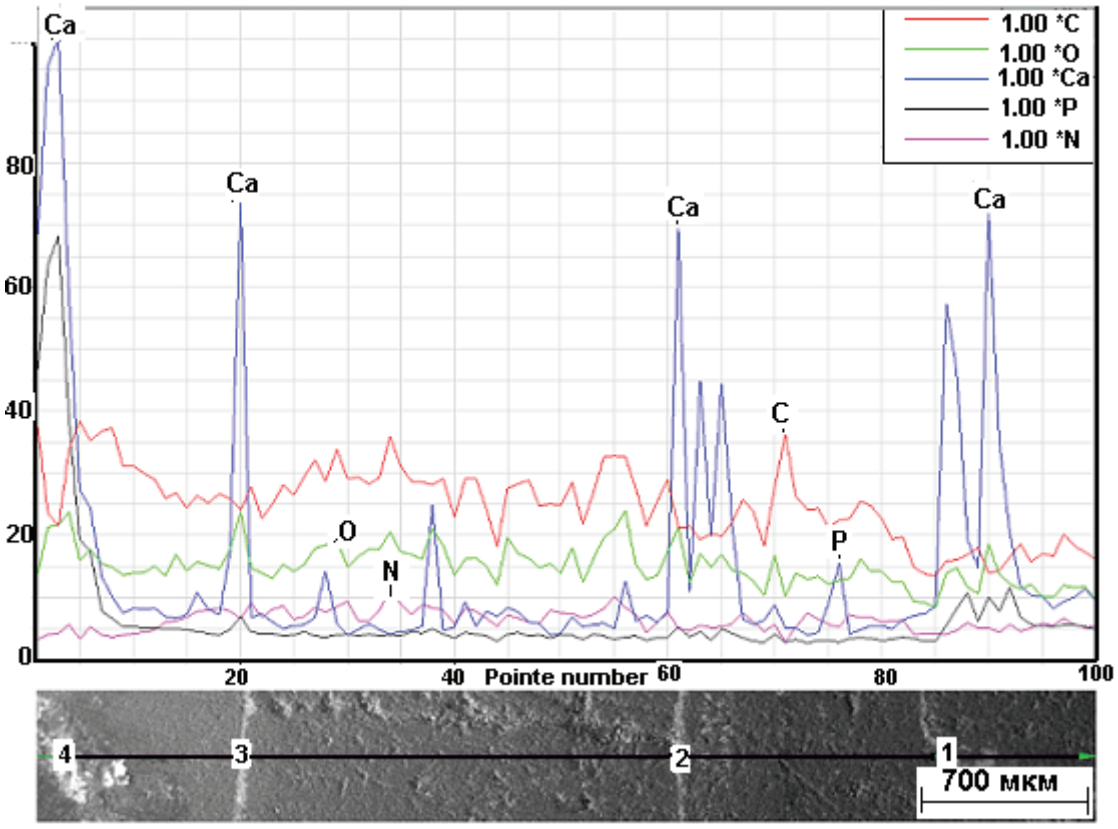


Рис. 2. *Распределение химических элементов (углерода, кислорода, кальция, фосфора, азота) по профилю (точки 1–4) в шлифе уролита*

кальций, который вместе с фосфором образует сложные фосфаты (карбонат-апатит и др.). Наличие границ между слоями и зонами в структуре уролита свидетельствует о различных параметрах (химизме) среды минералообразования.

Как следует из работы О.А. Голованової [4], основными параметрами минералообразующей среды в почке человека являются концентрации веществ, формирующих кристаллические фазы, и pH среды. Основными ионами, вступающими во взаимодействие и формирующими кристаллические фазы уролитов, являются: Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+, $C_2O_4^{2-}$, PO_4^{3-}, CO_3^{2-}, $C_5H_3N_4O_3^-$. На основании термодинамического и экспериментального моделирования О.А. Голованової установлено, что при повышении концентрации ионов первыми появляются в твердой фазе фосфаты магния и фосфаты кальция. Далее могут образовываться оксалаты магния и кальция. В кислых средах возможно образование уратов.

В медицинской литературе обсуждаются вопросы о возможности выведения уролитов из мочевой системы без хирургического вмешательства. М.Я. Жолондз в газете «Лечебные письма» [6] приводит информацию, касающуюся ионообменных процессов в организме человека. Эти процессы могут способствовать изменению химического состава и структуры уролита, уменьшению его прочности и разрушению до состояния «песка». Объясняется это тем, что ионы калия могут вытеснять ионы других металлов из их солей. В качестве источника ионов калия используется распространенное лекарство от сердечной аритмии – аспаркам (панангин). Также рекомендованы любые богатые калием и широко доступные травы и овощи в виде отваров. К ним относятся петрушка, кресс-салат, картофель, капуста зеленая, свекла, морковь.

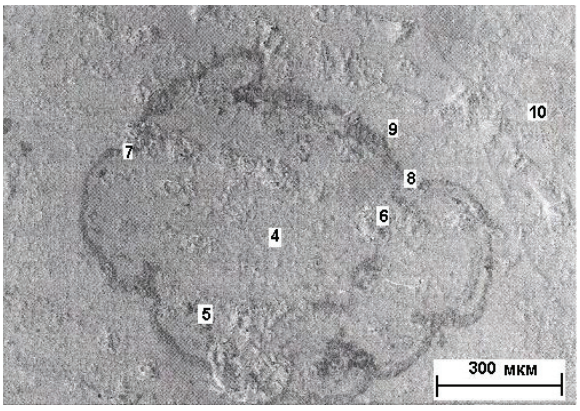


Рис. 3. *Расположение точек наблюдения (4–10) в плоскости шлифа*

На рис. 3 приведено положение наиболее характерных точек наблюдения в плоскости шлифа. Точки наблюдения выбраны с таким расчётом, чтобы можно было получить полное представление о характере распределения элементов в структуре уролита. Выбраны точки: в центре ядра (т. 4), бли-

же к периферии (тт. 5 и 6), на границе ядра (тт. 7 и 8) и за пределами ядра (тт. 9 и 10).

Таблица 2. *Содержание химических элементов в шлифе (наблюдения по 7 точкам)*

Элементы	Точки наблюдения						
	4	5	6	7	8	9	10
	Содержание, мас. %						
O	47,7	42,83	55,79	59,22	51,17	48,43	51,38
N	30,8	9,88	8,72	9,07	11,58	30,88	27,18
Ca	*	26,44	20,07	23,64	32,83	*	*
C	15,4	5,34	2,46	4,51	2,53	15,45	18,79
P	*	**11,91**	*	*	*	*	*
Na	*	*	*	*	*	*	*
Mg	*	*	**9,87**	*	*	*	*
Al	*	*	*	*	*	*	*
Si	*	*	*	*	*	*	*
S	*	*	*	*	*	*	*
Cl	*	*	*	*	*	*	*
K	**2,23**	*	*	*	*	**2,06**	*

**Ниже предела обнаружения.*

Отдельные химические элементы, такие как алюминий, кремний, сера и хлор в точках 4...10 встречаются в количествах, находящихся ниже предела определения. Фосфор и магний установлены каждый в одной точке, калий – в 2-х точках, кальций – в 4-х точках.

Наибольшее содержание (мас. %) в исследованных точках отмечено для следующих элементов: ***кислорода*** (59,2 в точке 7), ***азота*** (30,9 в точке 9), ***кальция*** (32,8 в точке 8), ***углерода*** (18,8 в точке 10), ***фосфора*** (11,9 в точке 5).

В точке 13 наибольшее содержание отмечено для кислорода и бария. Соединение этих элементов с серой способствовало образованию сульфата бария $BaSO_4$ (минерал барит).

В точке 14 зафиксировано два элемента – Fe и S, соединение которых способствовало образованию сульфида железа FeS_2 (минерал пирит).

В точке 15 отмечено повышенное содержание Zn и S (минерал сфалерит ZnS). Остальные элементы содержатся в меньших количествах, и их точное определение находится ниже предела

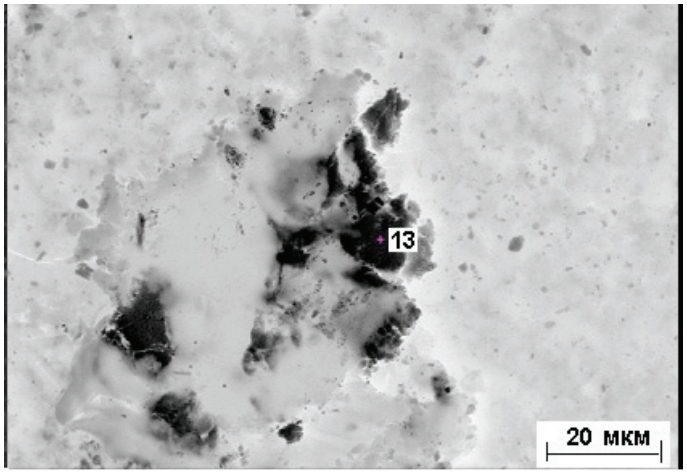


Рис. 4. *Точка 13 в шлифе Ch-1–2. Барит ($BaSO_4$)*

Элементы в т. 13	мас.%
Углерод	9,3
Кислород	53.3
Натрий	*
Кремний	*
Фосфор	*
Хлор	*
Калий	*
Кальций	*
Азот	8,9
Сера	4,7
Барий	23,0

*Ниже предела обнаружения

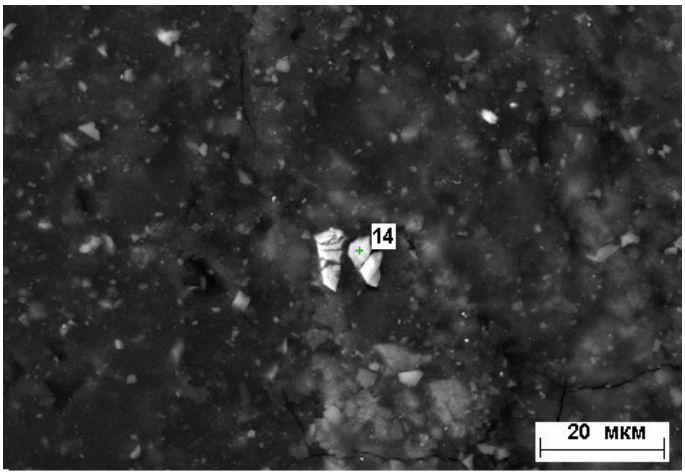
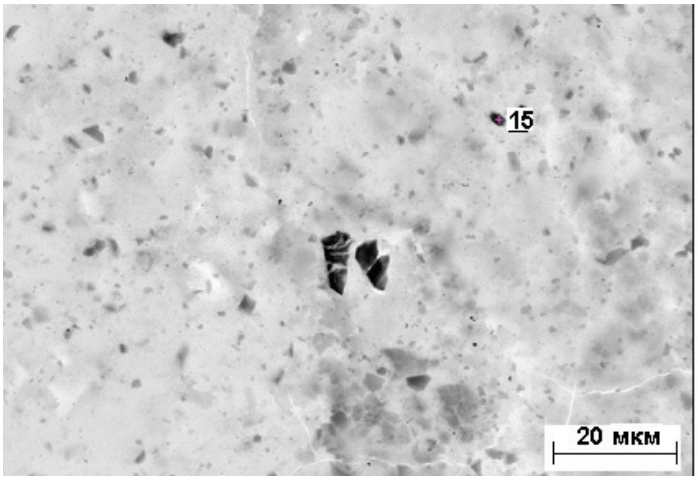


Рис. 5. *Точка 14 в шлифе Ch-1–2. Пирит (FeS_2)*

Элементы в т. 14	мас. %
Сера	40,2
Железо	59,8



Элементы в т. 15	мас. %
Углерод	11,8
Кремний	*
Фосфор	*
Кислород	16,3
Сера	**19,7**
Кальций	2,6
Калий	*
Железо	4,9
Цинк	**40,4**

*Ниже предела обнаружения

Рис. 6. *Точка 15 в шлифе Ch-1–2. Сфалерит (ZnS)*

обнаружения. В т. 16 установлено неожиданно высокое содержание As – 69,1 мас. %, также S – 30,8 мас. %; а в т. 18 также отмечены высокие содержания Sb – 70,8 мас. % и S – 29,1 мас. %.

Выводы

1. Получены данные, свидетельствующие о неоднородном распределении химических элементов в структуре уролита. Преобладают элементы следующих групп Периодической системы Д.И. Менделеева: I – Na, Ca, K; IV – C, Si; VI – O, S. Причина неоднородности в распределении элементов в структуре уролита заключается в периодическом изменении параметров среды минералообразования.
2. В структуре уролита выделяются зоны, границы между которыми подчёркнуты отчётливо выраженным преобладанием органического вещества по отношению к минеральному. Отмечено чередование зон, сложных по химическому составу и имеющих большие мощности по сравнению с относительно менее мощными зонами (преимущественно кальциевого состава). Содержание кальция в таких зонах возрастает при заметном снижении содержания углерода.
3. Отмечены существенные различия в содержании элементов как на границах между зонами, так и в плоскости среза (шлифа) уролита. Наибольшее содержание характерно для элементов: C, O, N, Ca, P.
4. Результаты исследований, полученные при изучении конкретного шлифа уролита, с определённой степенью осторожности могут быть экстраполированы на другие уролиты, не подвергнутые наблюдению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О химическом составе мочевых камней / Полиенко А.К., Грибанова А.А.; Томск. политехн. ин-т. – Томск, 1997. – 5 с. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 24.12.1997, № 3742 – 97.
2. Особенности биохимического состава мочевых камней / Полиенко А.К., Грибанова А.А.; Томск. политехн. ин-т. – Томск, 1997. – 6 с. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 31.12.1997, № 3859 – 97.
3. Голованова О.А., Борбат В.Ф. Почечные камни. – М.: Медицинская книга, 2005. – 171 с.
4. Голованова О.А. Биоминералогия мочевых, желчных, зубных и слюнных камней из организма человека: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2007. – 333 с.
5. Севостьянова О.А., Полиенко А.К. Структурные особенности ритмической зональности уролитов (мочевых камней) // Записки Российского минералогического общества. – 2010. – Т. 4. – № 5. – С. 93–100.
6. Жолондз М. Я. И камни растворятся! // Лечебные письма (СПб.). – 2006. – № 16. – С. 20–24.

Поступила 15.12.2011 г.

УДК 548.75:549.514.51

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КВАРЦИТОВ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

М.В. Коровкин, Л.Г. Ананьева, А.А. Анциферова

Томский политехнический университет
E-mail: mvk@tpu.ru

Методом инфракрасной спектроскопии исследовались образцы кварцитов, отобранных из рудных тел месторождения «Сопка-248» Антоновской группы месторождений (Россия, Западная Сибирь). Осадочно-метаморфические кварциты являются продуктом литификации в условиях раннего метагенеза кварцево-гидрослюдисто-серицитовой фации. В результате метаморфизма кремнистой биогенной толщи происходила кристаллизация аморфного кремнезёма и появление кристаллической фазы ?-кварца, Для оценки степени изменения кварцитов использовался индекс кристалличности, рассчитанный по параметрам двойного пика инфракрасного поглощения при 778 и 797 см$^{-1}$, который обусловлен колебаниями Si–O–Si связей в кварце. Отмечено, что наиболее чистые разновидности кварцитов характеризуются наименьшими относительными значениями индекса кристалличности.

Ключевые слова:
Инфракрасные спектры, кварциты, индекс кристалличности

***Key words**:*
Infrared spectra, quartzite, crystallinity index.

Введение

В последние годы возрастающий спрос на высококачественное кварцевое сырье вызван ростом производства новых материалов и изделий, получаемых из кварца (оптоволоконные системы связи, специальные виды стекла, кристаллический кремний для электронной промышленности и, особенно, кремний «солнечного» качества для изготовления фотоэлектрических преобразователей – солнечных батарей). В связи с этим актуальна задача оценки качества и перспектив использования в промышленности недефицитных кварцевых пород – кварцитов и кварцевого песка, которые могут служить источником дешевого, но высокочистого кварцевого сырья.

В Западной Сибири (Россия) потенциальным источником высококачественного кварцевого сырья являются кварциты Антоновской группы месторождений [1–3]. По своему происхождению кварциты относятся к осадочно-метаморфическим отложениям и являются продуктом литификации в условиях раннего метагенеза кварцево-гидрослюдисто-серицитовой фации [4]. В результате метаморфизма кремнистой биогенной толщи происходила кристаллизация аморфного кремнезёма и появление кристаллической фазы α-кварца. При данных условиях формирования микрокварцитов происходило самоочищение кварцевых микрогранул (явление автолизии при кристаллизации), хорошо известное при синтезе минералов [5].

Нами сделано предположение [6], что оценку степени преобразования кремнистой толщи и выявление наиболее чистых разновидностей кварцитов возможно провести путём определения индекса кристалличности K_i, который использовался в работах [7, 8] при исследовании структурной неупорядоченности халцедонов методом инфракрасной (ИК) спектрометрии.

Методики эксперимента

Для исследования кварцитов Антоновской группы месторождений отбирались штуфные пробы кварцитов разрабатываемого месторождения «Сопка-248» во время полевых работ 2000–2006 гг. Пробы кварцитов разных технологических марок отбирались по всей площади, с уступов карьера и из скважин, из центральной и периферийных частей всех рудных тел месторождения. Всего отобрано 134 пробы, из которых изготовлено более 500 образцов для различных видов анализа. Цветовая окраска отобранных кварцитов варьировалась от белых, сероватых до черных и от розоватых до красных (фото в таблице). Наибольший интерес, как потенциально чистый кремнезем, представляли визуально наиболее «чистые», не окрашенные гидроокислами Fe и Mn штуфы; наиболее чистые кварциты отмечаются в центральных частях рудных тел [3].

Спектры ИК-поглощения регистрировались на спектрофотометре Specord M40 в интервале 400...4000 см$^{-1}$ с разрешением 0,01 см$^{-1}$, а также на спектрофотометре с преобразователем Фурье IR-Prestige-21 фирмы «Shimadzu» (FT-IR – 8400S) в интервале 300...4000 см$^{-1}$ с разрешением 0,001 см$^{-1}$ с использованием программного обеспечения IRsolution. Зависимость пропускания T инфракрасного излучения через образцы кварцитов от частоты падающего ИК-излучения ν представлена на рис. 1.

Образцы для исследований были подготовлены в равных условиях из отобранных проб кварцитов. Исследуемый образец (массой 4 мг) растирался в агатовой ступке до фракции менее 2 мкм и смешивался с порошком KBr (массой 400 мг) квалификации «о.ч.» или «ч.д.а.», помещался в прессформу и прессовался под давлением 10 т/см^2 в прозрачные тонкие диски. При измерении ИК-спектров

на спектрофотометре FT-IR – 8400S навеска образца составляла 0,5 мг. Во всех измерениях обеспечивалась одинаковая масса исследуемого образца.

Микрофотографии кварцитов (с увеличением до 40000 раз) сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi 3400N с энергодисперсионным спектрометром EDx Bruker (X Flash 4010), исследования проводились во вторичных (SE) и обратно-рассеянных электронах (BSE). Разрешающая способность микроскопа составляла 3 нм.

Результаты и обсуждение

В инфракрасных спектрах кварцитов обнаруживается спектральная картина α-кварца: интенсивная полоса в области 1165...1090 см$^{-1}$ (Si–O-валентные колебания), средней интенсивности двойной пик (дублет) 800...778 см$^{-1}$ (колебания связанных SiO_4 -тетраэдров), полоса меньшей интенсивности 693 см$^{-1}$, и две весьма интенсивные полосы около 525 и 465 см$^{-1}$, а также полосы 370 и 395 см$^{-1}$, которые связаны с O–Si–O деформационными колебаниями (рис. 1).

Однако, в отличие от крупнокристаллического α-кварца, в ИК-спектрах кварцитов, также как и в спектрах халцедонов [7, 8], полоса 1165...1090 см$^{-1}$ становится более диффузной (она уширяется за счет правого плеча 1000...950 см$^{-1}$), уменьшается интенсивность дублета {797, 778} см$^{-1}$, а полоса 525 см$^{-1}$ смещается к значениям 508...510 см$^{-1}$, что свидетельствует о структурной неупорядоченности и понижении степени кристалличности кварцитов.

Впервые для оценки степени кристалличности кварца K. Murata и M. Norman II [9] предложили определять «индекс кристалличности» путём расчёта отношений интенсивностей двойного пика при 2θ=67,74° на рентгенограммах, полученных методом рентгеновской спектрометрии.

В работе [10] индекс кристалличности кварца оценивался по интенсивности пика ИК-поглощения при 1145 см$^{-1}$, который практически не выделяется в ИК-спектрах исследуемых нами тонкозернистых кварцитов (рис. 1).

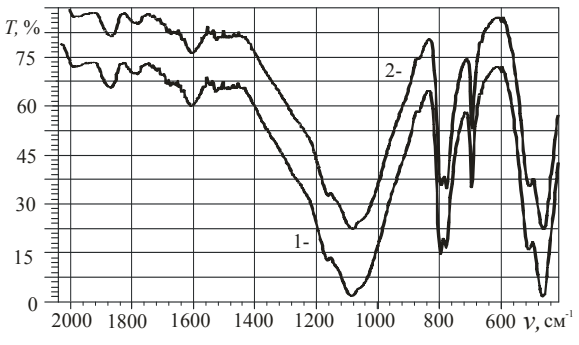


Рис. 1. *Фрагменты спектров ИК-поглощения в области 2000...400 см$^{-1}$ образцов кварцитов Антоновского месторождения: 1) белого и 2) серого кварцита*

Кристаллическая фаза α-кварца определяется наличием двойного пика поглощения 800...778 см$^{-1}$. С изменением степени кристалличности вид данного дублета меняется. Характерный для α-кварца двойной пик ИК-поглощения при 778 и 797 см$^{-1}$ обусловлен фундаментальными колебаниями разного типа симметрии Si–O–Si связей в кремнекислородном тетраэдре [11]. По мнению И.И. Плюсниной [8] именно этот двойной пик можно использовать для получения относительного критерия оценки кристалличности кварца, отражающей степень его изменения. Положение этого двойного пика по спектру, средняя интенсивность, отсутствие суперпозиции других полос и большая чувствительность к структурным изменениям явилась причиной его использования для расчёта индекса кристалличности по формуле

$$K_i = 10fa/b,$$

где f – коэффициент пропорциональности для эталонного кварца (f=2,8); a/b – отношение величины слабого пика 778 см$^{-1}$ к его коротковолновому плечу (рис. 2).

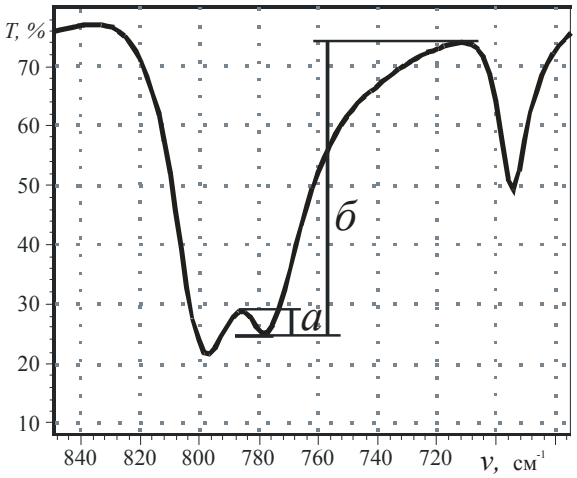


Рис. 2. *Пояснение к методике расчёта индекса кристалличности по изменению двойного пика 800...778 см$^{-1}$ в спектрах инфракрасного поглощения*

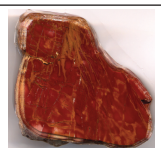
По этой методике вычислены значения индекса кристалличности образцов кварцитов месторождения «Сопка-248», таблица.

Приведенные в таблице усреднённые значения индекса кристалличности получены по результатам измерения 5–7 образцов. Эти значения отражают некоторые относительные значения индекса кристалличности, отражающие, по нашему мнению, степень преобразования кварцитов.

Действительно, мелкокристаллические кварциты месторождения «Сопка-248», отличающиеся достаточно высокой чистотой [3], как правило, характеризуются расчётными значениями индекса кристалличности в пределах 2,16...2,18. С глубиной, а также от центральных участков рудного тела к периферии кварциты изменяют свой химический состав и цвет; степень кристалличности их повышается до значений 2,75...3,16. Общее содержание элементов – примесей даже в необогащенной породе показывает, что данные кварциты практически не уступают традиционно чистому гранулированному кварцу. Общее содержание примесей

в зерне составляет менее 10 ppm. Кварциты почти полностью состоят из кварцевых микрозерен с плотной упаковкой, размер которых варьирует в пределах от 0,01 до 50 мкм (рис. 3).

Таблица. *Значения индекса кристалличности кварцитов*

Фотография аншлифа	Образец	K_i
	Кварцит белый	2,21
	Кварцит серый с примазками окислов железа	2,52
	Кварцит черного цвета	2,75
	Кварцит серого цвета с примазками Mn	3,16
	Яшмовидный кварцит буровато-вишневого цвета с черными прожилками	5,6

Однако, установить связь между линейными размерами кварцевых кристаллитов и изменением значений индекса кристалличности в данной работе пока не удалось.

В локальных участках, особенно в зонах повышенного дробления, изначально химически чистые кварциты под влиянием гипергенных процессов ухудшают свои качественные характеристики, но индекс кристалличности повышается для отдельных образцов до значений 5,6.

Следует отметить, что рассчитанные по предлагаемой методике значения индекса кристалличности кварцитов использованы для сравнительного анализа кварцевого сырья в пределах одного месторождения.

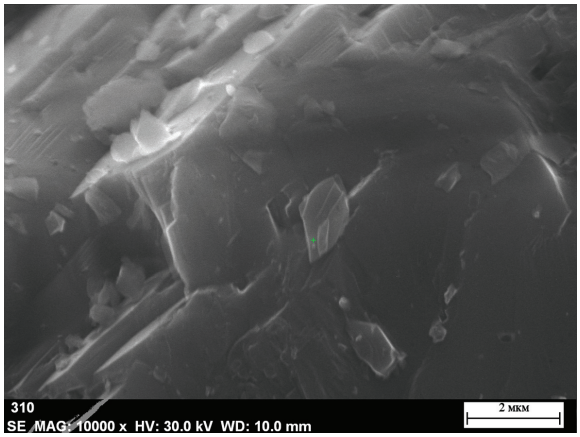


Рис. 3. *Фотография образца микрокварцита, полученная с помощью электронного микроскопа*

Заключение

В пределах месторождения кварцитов «Сопка-248» Антоновской группы месторождений (Россия, Западная Сибирь) возможно проведение оценки степени преобразования осадочно-метаморфической толщи кварцитов путем определения индекса кристалличности, рассчитанного по параметрам двойного пика при 778 и 797 $см^{-1}$ в спектрах инфракрасного поглощения. Учитывая, что наиболее чистые разновидности характеризуются наименьшими значениями индекса кристалличности, такая оценка может служить генетическим признаком и использоваться для дальнейшего технологического картирования.

Авторы выражают благодарность аспиранту кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ С.С. Ильенку за помощь в проведении экспериментов на сканирующем электронном микроскопе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В.Б. Геологическое строение Антоновской группы месторождений кварцитов // Горный журнал. – 2000. – № 7. – С. 7–9.
2. Ананьев Ю.С., Ананьева Л.Г., Долгов И.В., Коробейников А.Ф., Коровкин М.В. Поиски, оценка и обогащение кварцевого сырья для высоких технологий // Известия Томского политехнического университета. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 123–130.
3. Ананьева Л.Г., Коровкин М.В. Минералого-геохимическое изучение кварцитов Антоновской группы месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 3. – С. 50–55.
4. Коровкин М.В., Ананьева Л.Г. Оценка степени метаморфизма кварцитов по данным минералогических исследований // Теория, история, философия и практика минералогии: Матер. IV Междунар. минералогического семин. – Сыктывкар: Геопринт, 2006. – С. 125.
5. Хаджи В.Е., Цинобер Л.И., Штеренлихт Л.М. Синтез минералов. Т. 1. – М.: Недра, 1987. – 487 с.
6. Ананьева Л.Г., Анциферова А.А., Коровкин М.В. Оценка степени преобразования кварцитов методом инфракрасной спектрометрии // Матер. Всеросс. минералогического семинара с международным участием. – Сыктывкар: Геопринт, 2010. – С. 39–40.
7. Плюснина И.И. Исследование структурной неупорядоченности халцедонов методом инфракрасной спектроскопии // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 240. – № 4. – С. 839–842.
8. Барсанов Г.П., Плюснина И.И., Яковлева М.Е. Особенности состава, некоторых физических свойств и структуры халцедона / Новые данные о минералах СССР. – М.: Наука, 1979. – Вып. 28. – С. 3–33.
9. Murata K.J., Norman II M.B. An index of crystallinity for quartz // American Journal of Science. – 1976. – V. 276. – P. 1120–1130.
10. Shoval S., Ginott Y., Nathan Y. A new method for measuring the crystallinity index of quartz by infrared spectroscopy // Mineralogical Magazine. – 1991. – V. 55. – P. 579–582.
11. Силинь А.Р., Трухин А.Н. Точеные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO_2. – Рига: Зинатне, 1985. – 244 с.

Поступила 14.11.2011 г.

Геология и полезные ископаемые

УДК 553.411.071:553.078.2

СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В СЮЛЬБАНСКОЙ ЗОЛОТОРУДНОЙ ЗОНЕ (БАССЕЙН СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ВИТИМ). Ч. 2. УРЯХСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ

И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов

Томский политехнический университет
E-mail: kucherenko.o@sibmail.com

Приведено описание важнейших разломно-трещинных структур Уряхского рудного поля, определяющих размещение золото-сульфидно-кварцевой минерализации, и диаграмм трещиноватости горных пород. Реконструированы планы силового поля на предрудном и рудном этапах формирования структуры рудного поля. Показаны различия масштабов рудовмещающих структур, образованных в Каралонском и Уряхском рудных полях. В сравнительном аспекте обсуждаются результаты изучения структурно-динамических режимов образования золотого оруденения на северном фланге Сюльбанской золоторудной зоны и формулируются выводы.

Ключевые слова:
Сюльбанская золоторудная зона, Каралонское, Уряхское рудные поля, глубинные разломы, рудовмещающие структуры, тектонические деформации, динамические режимы.

Key words:
Sulban gold-ore zone, Karalon, Urjah ore fields, depth fractures, containing ore structures, tectonic deformations, dynamic regimes.

Введение

Гидротермальное оруденение на рудоносных территориях всех масштабов, начиная от металлогенических поясов и кончая рудными столбами, контролируется разломными тектоническими структурами. Мезотермальные золоторудные поля образованы в сфере деформационного воздействия на субстрат земной коры глубинных разломов преимущественно в обрамлении последних. Приуроченность промышленного оруденения к структурам, оперяющим рудоконтролирующие глубинные разломы, выполняющие и растворопроводящую функцию, обусловлена, как полагают, неспособностью этих нередко не выходящих на дневную поверхность «слепых» структур обеспечить транзит металлоносных растворов к поверхности Земли, что исключало бы рудообразование.

Наблюдаемая в золоторудных полях ориентировка рудовмещающих и сопровождающих разломов-трещин относительно стволовых разломов, разная в зависимости от их кинематических и морфологических типов, воспроизведена в экспериментах еще в первой четверти прошлого столетия [1, 2]. Согласно результатам экспериментов, в условиях осевого сжатия в изотропной (квазиизотропной) по механическим свойствам среде формируется главная (стволовая) трещина скола (в экспериментах – сдвиг), а в боках ее – трещины-сателлиты трех систем: двух систем скола и одной – отрыва. Трещины первых двух систем согласны с главной по простиранию, но имеют встречное падение, третьей – образуют тупой угол с направлением движения несущего их бока оперяемой структуры. Однако в отличие от экспериментальных данных, в природе обычно образуются не три системы, а одна или две, что, вероятно, обусловлено анизотропией механических свойств субстрата.

Результаты экспериментов доказывают одновременное образование и взаимозависимость всех перечисленных структурных элементов. Это создает условия для решения обратной задачи – реконструкции кинематики разломов и трещин, планов силового поля и тектонической «жизни» всего каркаса образованных структур в процессе их последующих многократных подновлений.

Усложнения в эту схему вносят специфические в каждом объекте особенности строения рудовмещающих объемов земной коры, обусловленные их конфигурацией, разными количественными и пространственными соотношениями отличных по механическим свойствам пород, существованием ранее образованных разломов, разного рода ослабленных направлений и пр. В подобных механически анизотропных средах могут возникать дополнительно системы разломов, ориентировка которых отклоняется от таковой, получаемой в упомянутых экспериментах в приложении к механически изотропной среде. Тем не менее, с учетом кинематики разломов, их пространственно-временных соотношений реконструкция динамических условий образования типовых и дополнительных одновременно возникающих разломов, как правило, не представляет неразрешимой задачи.

В свою очередь, понимание условий рудообразования в структурно-динамическом его аспекте в сочетании с минералогическими, геохимическими и другими данными способствует корректному прогнозу оруденения.

Описанный механизм формирования рудовмещающих и сопровождающих структурных элементов в боках рудоконтролирующих глубинных разломов реконструирован авторами в двух мезотермальных золотых месторождениях, образованных в разных по внутреннему устройству средах [3, 4].

В Берикульском месторождении (Кузнецкий Алатау) рудные жилы вмещают массивные сверхпрочные покровные базальты среднего кембрия, слагающие в северо-восточном крыле антиклинальной складки клиновидный блок, который вследствие сближения его границ уменьшается в северо-западном направлении и с глубиной. Ограниченный более пластичными известняками на западе и габброидами на востоке, он выполнял функцию локализатора рудовмещающих и сопутствующих разломов. Месторождение Чертово Корыто в Патомском нагорье сложено раннепротерозойской толщей углеродистых терригенных сланцев, образующей пологую синклинальную субширотную брахискладку в призамковой ее части.

В обоих месторождениях в результате импульсов осевого тангенциального сжатия в наиболее активных висячих боках взбросо-сдвигов – ответвлений глубинных разломов по нормали к направленной вверх оси максимальных растягивающих напряжений образованы пологие тектонические структуры – падающая (16°) на юг система трещин отрыва, выполненных жилой № 4 мощностью до 20 м и протяженностью по падению около 800 м в Берикульском месторождении, и падающая (10...20°) на запад зона разуплотнения сланцев – отрыва и подъема ее висячего бока, вмещающая субгоризонтальную рудную залежь с прожилково-вкрапленной минерализацией мощностью до 140 м и протяженностью по падению около 500 м в месторождении Чертово Корыто.

Специфические условия Берикульского месторождения служили причиной синхронного образования сопряженных с пологим разломом двух систем разломов сколовой природы, – «типовых» субпараллельных Главному нарушению – взбросо-сдвигу северо-западного простирания, и ориентированных поперечно к нему дополнительных разломов северо-западного падения под значительными (30...50°) углами. Последние выполнены многочисленными золоторудными кварцевыми жилами. В месторождении Чертово Корыто пологая зона и многочисленные золоторудные кварцевые жилы, выполняющие в ее составе субгоризонтальные трещины отрыва, сопровождаются всего лишь мелкими трещинами скола встречного рудоконтролирующему сдвиго-взбросу крутого (40°) падения.

В том и другом месторождениях на предрудном этапе образования разломов-трещин реконструированная ориентировка главных осей напряжений силовых полей в основном согласуется с правилом В. Риделя [4]. Этот вывод следует из того очевидного факта, что образование мощных пологих структур отрыва возможно при направленной вверх ориентировке оси максимальных растягивающих напряжений, – в направлении наименьшего сопротивления среды осуществлялась разрядка усилий осевого тангенциального сжатия при образовании и/или функционировании рудоконтролирующих взбросов. В Берикульском месторождении по совокупности признаков ось тангенциального сжатия была ориентирована под острым углом к Главному нарушению и субпараллельным ему разломам, что обусловило в них значительные взбросовую и сдвиговую составляющие, в месторождении Чертово Корыто – примерно по нормали в горизонтальной плоскости к рудоконтролирующему разлому.

Специфика Берикульского месторождения, обусловленная, как представляется, локализующей функцией базальтового блока, заключается в образовании дополнительной системы жильных разломов-трещин скола «лестничного» типа, поперечных по простиранию к оси сжатия, но в вертикальной плоскости образующих с последней острый (<45°) угол, что согласуется с экспериментально установленным при осевом сжатии положением одной из возможных поверхностей максимальных скалывающих напряжений. Специфика месторождения Чертово Корыто выражена в большой мощности пологой рудовмещающей зоны раздвига-отрыва, чему способствовало субнормальное положение слоев осадочной толщи к направлению вертикальных максимальных растягивающих напряжений. В этом случае, в отличие от сверхпрочных массивных базальтов Берикуля, растягивающие усилия обеспечили отрыв (раздвиг) многочисленных слоев осадочных пород благодаря уже существовавшим поверхностям отдельности и синскладчатого рассланцевания в значительном вертикальном диапазоне. Отсутствие крупных и образование лишь мелких субпараллельных разлому

по простиранию круто падающих ему навстречу «пустых» трещин скола здесь обусловлено той же причиной – слоистостью толщи, в которой концентрация максимальных скалывающих напряжений в значительных объемах пород исключалась вследствие обилия межслоевых поверхностей рассланцевания, гасивших скалывающие усилия.

Крутопадающие (30...50°) и пологие (до 10...20°) зоны рассланцевания и дробления вмещают продуктивную золото-сульфидно-сульфосольно-кварцевую минерализацию на северном фланге Сюльбанской золоторудной зоны – одноименной зоны глубинных разломов. Предположение о том, что описанный механизм структурной подготовки и сопровождения рудообразования был задействован природой и здесь, подтвердилось в процессе изучения структуры двух соседних золоторудных полей – Каралонского и Уряхского.

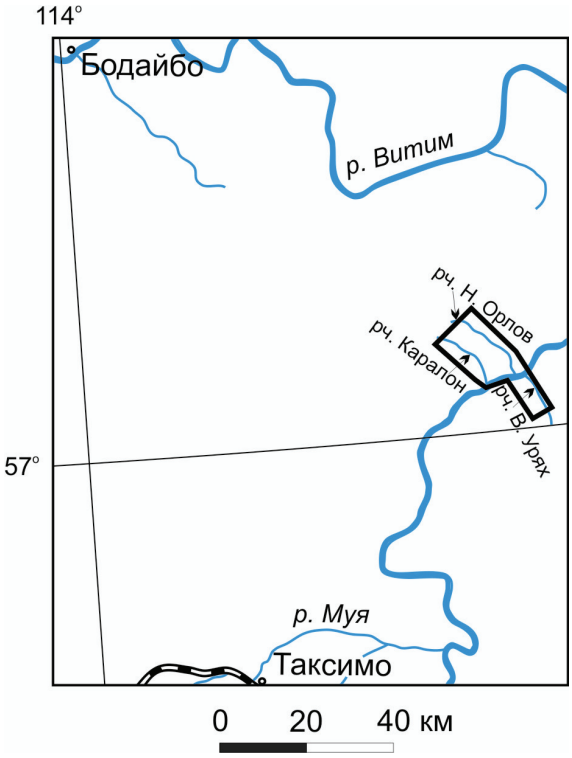


Рис. 1. *Схема расположения северного фланга (в контуре) Сюльбанской золоторудной зоны в бассейнах ручьев Каралон, Н. Орлов и В. Урях*

Разделение рудоносного блока, слагающего северный фланг Сюльбанской золоторудной зоны, на два рудных поля сложилось исторически по формальным основаниям: Каралонское рудное поле расположено на левобережье р. Витим на территории Бурятской республики и изучалось коллективами ПГО «Бурятгеология», Уряхское – на правобережье р. Витим в пределах Иркутской области и изучалось коллективами ПГО «Иркутскгеология» (рис. 1). Основные черты геологического строения и развития, структурные условия размещения, вещественный состав минерализации, в том числе продуктивной, формационная принадлежность околорудных метасоматитов в обоих рудных полях аутентичны. Поэтому результаты реконструкции структурно-динамических режимов их образования в определяющих чертах совпадают. Однако есть и отличия, имеющие в том числе прикладное значение.

Структурно-динамические режимы образования Каралонского рудного поля описаны в [5]. Реконструкция структурно-динамических режимов образования Уряхского рудного поля, обсуждение материалов, приведенных в обеих частях статьи, и выводы составляют содержание данной второй ее части.

1. Краткий очерк геологического строения Уряхского рудного поля

Краткое описание геологической позиции и геологического строения северного фланга Сюльбанской золоторудной зоны и Каралонского рудного поля приведено в [5].

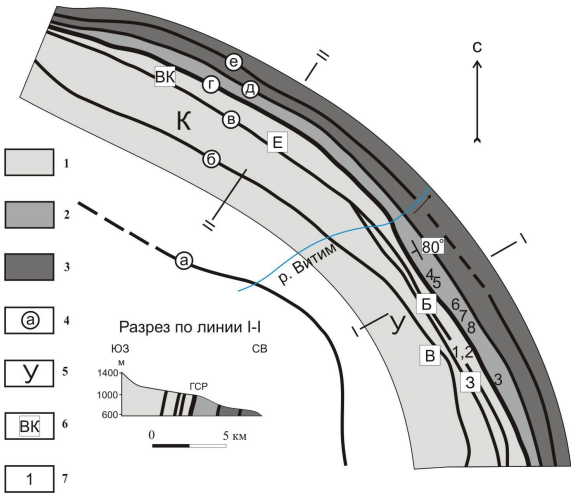


Рис. 2. *Схема строения северного фланга Сюльбанской зоны глубинных разломов (по А.Н. Демину, 1985 г., с упрощениями и добавлениями): 1) келянская свита покровных вулканитов (R_3); 2) водораздельная свита терригенных углеродистых сланцев (R_3); 3) усть-уряхская свита мраморизованных известняков (R_3); 4) глубинные разломы: а – Усть-Каралонский, б – Каралонский, в – Водораздельный, г – Главный Сюльбанский (ГСР), д – Верхне-Уряхский, е – Орловский; 5) рудные поля: К – Каралонское, У – Уряхское; 6) участки: ВК – Верхне-Каралонский, Е – Еленинский, Б – Барачный, В – Ветвистый, З – Золотой; 7) площадки массовых замеров трещин*

Уряхское рудное поле сложено тремя разделенными субпараллельными крутопадающими на запад глубинными разломами позднерифейскими толщами: вулканогенной полно дифференцированной келянской, черносланцевой водораздельной и известняковой усть-уряхской (рис. 2). Вулканиты келянской свиты прорваны небольшими уплощенными ориентированными согласно простиранию толщ и разломов телами габбро и плагиогранитов позднерифейского муйского габбро-гранитного комплекса. В рудном поле известны

также небольшие тела гранитов в сопровождении даек кислых пород, объединяемые в вендский падоринский гранитоидный комплекс, и дорудные, внутрирудные дайки основного состава, на периферии Сюльбанской зоны пересекающие известные здесь тела позднепалеозойского конкудеромамаканского гранитоидного комплекса.

В отличие от Каралонского рудного поля, в котором основные дайки образуют субширотные пояса, в Уряхском рудном поле они представлены одиночными телами преимущественно северо-северо-западного простирания. Все породы подверглись метасоматическим преобразованиям пропилит-березитового профиля. Рудные тела сложены тремя минеральными комплексами, образованными в трехстадийном гидротермальном процессе. Продуктивная минерализация представлена золото-пирит-полиметаллической с кварцем ассоциацией и отложена в температурном интервале 340...200 °С. Рудные тела всех морфологических типов – кварцевые жилы, крутопадающие и субгоризонтальные минерализованные зоны залегают в сфере деформационного воздействия на горные породы Главного Сюльбанского разлома – основной рудоконтролирующей и, очевидно, растворопроводящей в Сюльбанской зоне структуры.

2. Литологические и структурные условия залегания гидротермальной минерализации в Уряхском рудном поле

Чтобы понять влияние структурных факторов на образование и размещение гидротермальной рудной минерализации и, исходя из этого понимания, использовать полученные знания для прогнозирования оруденения, требуется, в частности, познать кинематику и динамику рудоконтролирующих и растворопроводящих разломов на предрудном и рудном этапах формирования структуры рудоносных блоков земной коры. В Сюльбанской золоторудной зоне ту и другую функцию выполняли Главный Сюльбанский и Каралонский разломы, что доказывается приведенными в [5] и выше фактами.

Решение задачи опирается на систематизацию данных о горных породах, морфологии, внутреннем строении, минеральном выполнении и ориентировке в пространстве «стволовых» структур, сопровождающих (оперяющих) их разломов II порядка [5] и на результаты обработки массовых замеров мелкой трещиноватости горных пород.

В Уряхском рудном поле мощные субгоризонтальные предрудные полости раздвига (отрыва), подобные Верхнекаралонским и Еленинским [5. Рис. 4, 5], не известны.

Здесь, в обрамлении Главного Сюльбанского разлома в обоих его боках среди вулканитов и углеродистых сланцев залегают крутопадающие (50...80°) навстречу одна другой, но субсогласные ему по простиранию и сопровождающие его зоны дробления и рассланцевания мощностью до десятков ... многих десятков метров, имеющие, судя по морфологии и внутреннему строению, сколовое происхождение. В ближнем (сотни метров) обрамлении разлома они либо насыщены прожилково-вкрапленной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией, в сульфидной составляющей которой резко преобладает пирит при эпизодическом участии других сульфидов, либо вмещают протяженные жилы массивных кварцев, в большей части объема которых даже пирит – большая редкость. При средней мощности кварцевых жил до 1 м в раздувах, приуроченных к участкам изгибов вмещающих разломов II порядка, местами флексурообразных и коленчатых, они достигают мощности 15...24 м (жилы № 1, 2). В последнем случае в одной из подобных структур II порядка, вскрытой на участке Барачном (рис. 2) кварцевой жилой № 9 выполнены субмеридиональные и северо-восточного простирания части структуры, северо-западные с притертыми стенками не содержат кварца.

Обращает на себя внимание тот факт, что в крупных (до 3...5 м в поперечнике) глыбах, обломках и в коренном залегании кварц сохранил массивное строение, он не разбит даже на субсогласные ориентировке жил плиты, как это обычно бывает в жильных месторождениях, – его глыбы при столь крупных габаритах имеют примерно изометричную форму.

Механическим деформациям кварц подвергался в локальных объемах, в основном, в призальбандовых участках жил с образованием многочисленных сближенных субгоризонтальных трещин отрыва с характерными бугорчато-шероховатыми поверхностями стенок, с соответствием выступов впадинам на противоположных стенках, с общей причудливой конфигурацией. Трещины выполнены золотосодержащими кварц-сульфидными ассоциациями, – пирит-халькопиритовой, халькопирит-блеклорудной, комплексной полиметаллической. Подвергшиеся такой трещиноватости объемы, как правило, составляют незначительную часть общего объема жил. Продуктивная минерализация в крутопадающих кварцевых жилах прослеживается на всех участках Уряхского рудного поля в форме субгоризонтальных нередко эшелонированных по вертикали полос мощностью до десятков сантиметров ... первых метров, редко большей.

Значительной протяженности, до сотен метров, такие полосы достигают в сверхмощной выполняющей Главный Сюльбанский разлом Магистральной кварцево-карбонатной жиле, в которой квазиизотропный по механическим свойствам массивный крупнозернистый агрегат пересечен многочисленными золото-сульфидно-кварцевыми прожилками с чрезвычайно сложной морфологией и разнообразной ориентировкой (рис. 3). Прожилки выполняют трещины отрыва, ветвятся, пересекаются, образуют сетчатую текстуру, на коротких расстояниях изменяют свою ориентировку. Поверхности контактов прожилков недоступны для замеров их ориентировки, но по визуальной оценке наиболее крупные из них имеют пологое запад-северо-западное падение.



Рис. 3. *Сульфидно-сульфосольно-кварцевые прожилки в крутопадающей Магистральной кварц-карбонатной жиле, выполняющей Главный Сюльбанский разлом. Верховья ручья Малахитового – левого притока ручья Золотого (рис. 2, участок Золотой)*

Системы субгоризонтальных трещин отрыва образованы также в крутопадающих линзовидных телах массивных апогранитных березитов и березитоидов в висячем боку Главного Сюльбанского разлома (рис. 4, максимум IV).

Эти трещины имеют типичные для трещин отрыва неровные («рваные») контакты, нередко – «коленчатые» изгибы, протягиваются в доступных для наблюдения местах на расстояния более 10 м при расхождении стенок (мощности выполняющих их сульфидно-кварцевых прожилков) до 10 см, эшелонированы по вертикали, повторяясь через 10...20 см. Примесь сульфидов в жилах незначительна и среди них диагностированы пирит, галенит, халькопирит, присутствует золото. Кварц нередко друзовидный, призматические мелкие кристаллики его с головками- пирамидами ориентированы субнормально к стенкам трещин, что доказывает образование кристаллов в пустотах в условиях свободного роста.

3. Результаты массовых замеров мелкой трещиноватости горных пород

Системы мелких оперяющих разломы трещин, образованных в изотропных (квазиизотропных) по механическим свойствам породах, представляют первоочередной интерес, поскольку ожидается, что их морфологические черты и ориентировка по отношению к оперяемым структурам согласуются с экспериментальными моделями и, следовательно, они могут быть использованы для реконструкции силовых деформационных полей.

Массовые замеры трещин выполнены на восьми площадках протяженностью 10...20 м каждая (рис. 2): в однородных по составу массивных (слабо трещиноватых) апогранитных березитах (площадка № 1), в зоне рассланцевания березитизированных вулканитов (площадка № 2), в зоне рассланцевания березитизированных углеродистых сланцев (площадка № 3), в обнажениях углеродистых сланцев (площадки № 4, 5, 8) и мраморизованных известняков (площадки № 6, 7) водораздельной свиты, расположенных вдоль левого борта ручья В. Урях. Первые три площадки расположены на расстояниях до 100 м от Главного Сюльбанского разлома, первых две – в его висячем боку, третья – в лежачем. Остальные площадки находятся на удалении от разлома до 1,0 км.

Замеры и изучение мелкой трещиноватости, обработка результатов выполнялись по стандартным методикам. В частности, на каждой площадке трещины изучались, по возможности, в стенках разной ориентировки, чтобы минимизировать эффект избирательности, возникающий вследствие меньшей доступности трещин, параллельных преобладающей в обнажении поверхности. Изучались состав

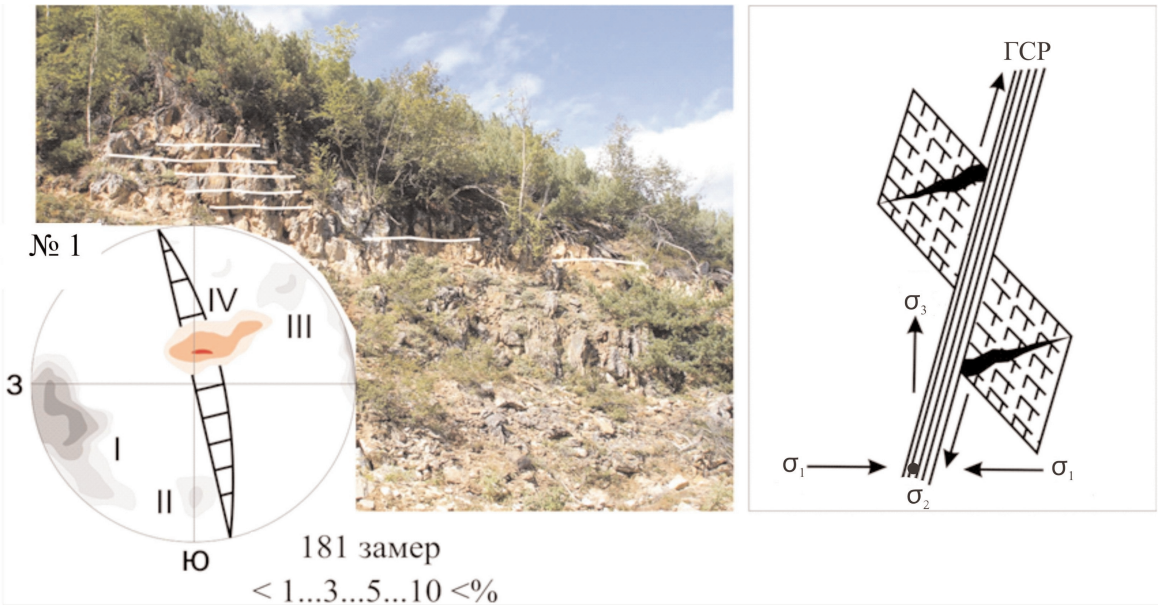


Рис. 4. *Площадка массового замера трещин № 1 в залежи апогранитных березитов на участке Ветвистом, диаграмма трещиноватости горных пород и объемная схема реконструкции силового поля рудного этапа. Оси: σ_1 – тангенциального сжатия, σ_2 – относительного растяжения, σ_3 – максимальных растягивающих усилий. Белыми линиями обозначены субгоризонтальные трещины отрыва (максимум IV), выполненные сульфидно-кварцевыми прожилками. На диаграмме показано положение Главного Сюльбанского разлома (ГСР)*

и строение пород, морфология трещин, особенности их поверхностей, ориентировка в пространстве, минеральное выполнение при его наличии. Полученные данные обрабатывались на равноплощадной проекции полусферы Вальтера–Шмидта.

В массивных апогранитных березитах и березитоидах (диаграмма 1, рис. 4) образованы три системы ровных гладких не заполненных минеральным веществом трещин скола (максимумы I–III) и описанная система минерализованных трещин отрыва (максимум IV).

Две системы трещин скола (максимумы I, III) согласны Главному Сюльбанскому разлому по простиранию, но имеют встречное крутое, как и разлом на Ветвистом участке, падение. Одна наиболее представительная в количественном отношении система (максимум I) субпараллельна разлому по падению и простиранию, вторая система крутопадающих навстречу разлому трещин выражена слабо. Малым числом трещин представлена также система поперечных субширотных трещин скола (максимум II), в разной степени распространенных и в других породах рудного поля.

Диаграмма массовых замеров мелких трещин № 1 демонстрирует классическое пространственное соотношение трещин обоих морфологических и кинематических типов, аутентичное полученному В. Риделем в экспериментах с той разницей, что здесь, в природе, мы имеем дело не со сдвигом, а со сдвиго-взбросом. На рис. 4 также приведена реконструкция силового поля, в режиме которого созданы перечисленные системы трещин.

На площадке массового замера трещин в рассланцованных березитоидах, образованных в вулканитах келянской свиты (диаграмма 2, рис. 5), трещины отрыва отсутствуют. Наибольшее развитие получили трещины скола, согласные простиранию и падению толщи вулканитов и флюидальной полосчатости внутри нее (два сближенных максимума I). Трещины скола поперечной ориентировки (максимумы II, III) несколько подчинены, но принадлежат к распространенным в породах рудного поля поперечным системам. Минеральное выполнение в трещинах отсутствует.

В карбонатно-слюдистых сланцах водораздельной свиты (площадка № 3) в лежачем боку Главного Сюльбанского разлома в непосредственной его близости в левом борту ручья Золотой образованы трещины скола двух систем: согласных ориентировке полосчатости (слоистости) сланцевой толщи (максимум I, рис. 5) и крутопадающих поперечных (максимум II). Как и в предыдущем случае, раздвоение максимума II обусловлено существенным изменением ориентировки трещин этой системы по простиранию и падению. Все трещины не содержат минерализацию.

На значительном удалении (не менее 1 км) от Главного Сюльбанского разлома в карбонатно-слюдистых, в том числе углеродистых сланцах (площадки № 4, 5, 8) и пестрых, в том числе обогащенных керогеном черных, темно-серых и серых мраморизованных известняках (площадки № 6, 7) водораздельной свиты идентифицированы только трещины скола (рис. 5). Наибольшее развитие получили трещины, согласные ориентировке толщи в целом, – это пологоволнистые трещины интенсивного рассланцевания (на всех диаграммах максимум I), число которых достигает 30 на 1 пог. м,

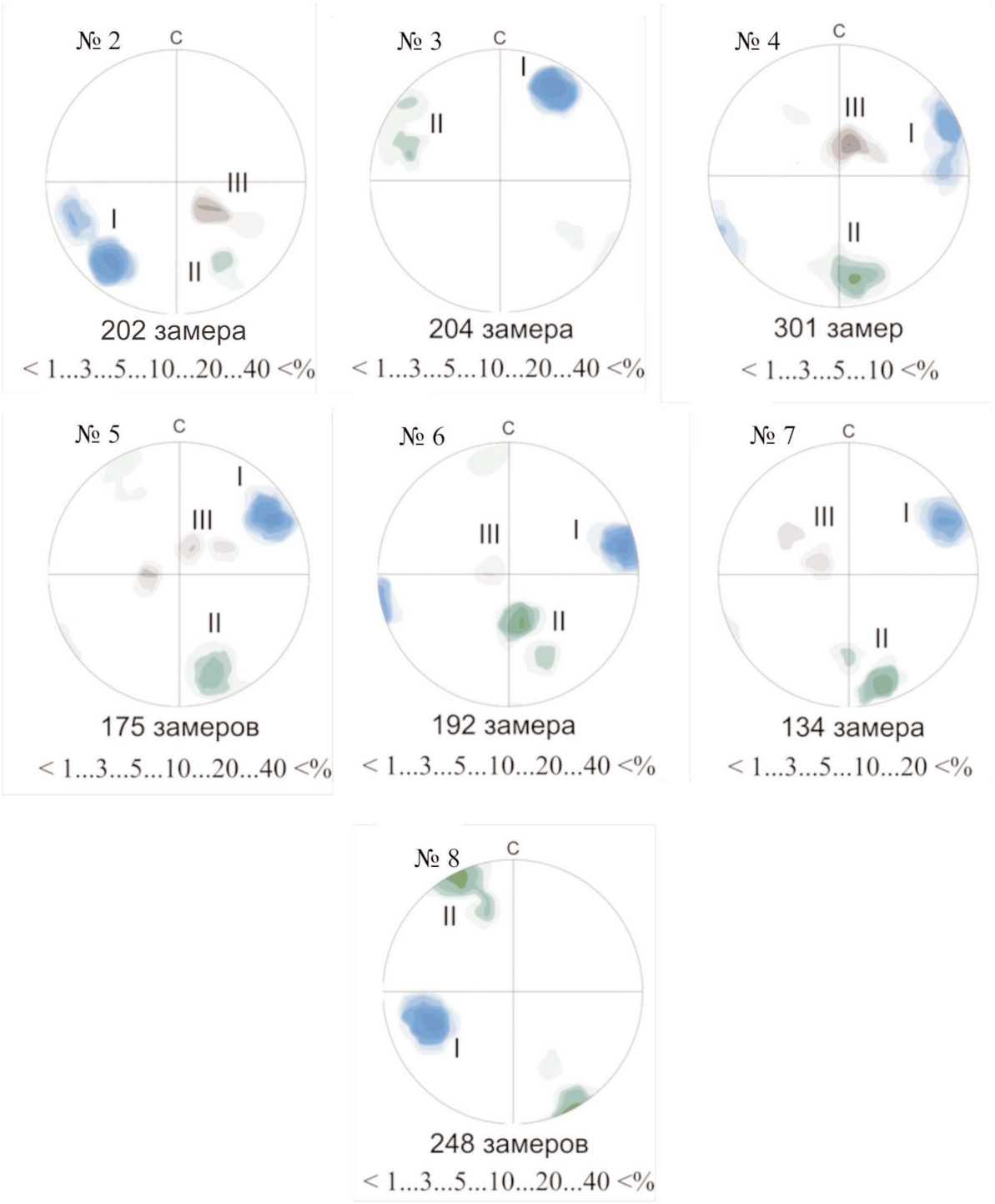


Рис. 5. *Диаграммы трещиноватости: рассланцованных вулканитов келянской свиты (№ 2), терригенных углеродистых сланцев водораздельной свиты (№ 3–5, 8), мраморизованных известняков водораздельной свиты (№ 6, 7). Расположение площадок массовых замеров трещин приведено на рис. 2*

иногда выполненные карбонат-кварцевыми прожилками с примесью пирита (площадка № 6, рис. 5).

Система поперечных крутопадающих трещин на всех диаграммах представлена максимумами II. Трещинам обеих главных систем присущи в целом незначительные вариации в ориентировке.

Среди поперечных к простиранию толщи трещин встречаются пологие, которые объединяются, как правило, в слабо выраженные максимумы (III). Число таких трещин изменяется в разных обнажениях от 2–3 до 5–7 на 1 пог. метр. Наиболее контрастно система поперечных (субширотных) пологих трещин скола выражена в обнажении 4 (рис. 5).

Здесь эти трещины имеют значительную протяженность и выполнены карбонат-кварцевыми прожилками мощностью до 10 см. Подобно жилкам, выполняющим трещины отрыва в апогранитных березитах, эти жилки также эшелонированы по вертикали. В обнажении высотой 1,5 м таких жилок насчитывается шесть. В кварце образованы грубые субгоризонтальные борозды скольжения, ориентированные по аз. 355°.

4. Обсуждение результатов и выводы

В качестве рудовмещающих структурных элементов Сюльбанской золоторудной зоны служат крутопадающие и пологие (субгоризонтальные) тектонические зоны, которые по мере удаления от Главного Сюльбанского, а на севере и Каралонского разломов в их висячих, а крутопадающие и лежачих боках на расстояниях до нескольких сотен метров исчезают. Наиболее крупные структуры располагаются в непосредственном обрамлении обоих разломов, здесь сосредоточена основная масса мощных протяженных крутопадающих и пологих кварцевых жил и минерализованных зон с прожилково-вкрапленной минерализацией. По этим основаниям рудовмещающие структуры рассматриваются как оперяющие Главный Сюльбанский и Каралонский разломы, выполнявшие рудоконтролирующую и растворопроводящую функции.

Крутопадающие разломы II порядка образованы по типу скола, пологие по типу структур отрыва. Масштабы первых сопоставимы на всем протяжении северной половины Сюльбанской золоторудной зоны, вторых – дифференцированы. Наиболее мощные пологие структуры отрыва известны в Каралонском рудном поле, но пока не обнаружены в Уряхском, где многочисленные системы мелких трещин отрыва, представляющие миниатюрное подобие крупных каралонских, образованы в квазиизотропных по механическим свойствам малообъемных средах, – в крутопадающих жилах массивного кварца и карбонатов и залежах массивных березитов.

Отложению рудно-минеральных комплексов предшествовала мощная гидротермальная проработка вмещающих пород в обоих боках разломов и образование сопряженных пропилитовой и березитовой метасоматических формаций, причем производные наиболее глубоких преобразований пород – березиты формировались преимущественно в зонах наиболее высокой проницаемости, то есть в разломах. Это, в сочетании с признаками отложения кварца в открытых полостях, доказывает преимущественную циркуляцию растворов именно в них и перераспределение вещества с поступлением углекислоты, серы, калия, выносом натрия и частично кремнезема. Удаленный из пород кремнезем с участием ранних карбонатов отложен в составе жил и прожилков в крутопадающих зонах рассланцевания и пологих зонах дробления. Продуктивные золотоносные ассоциации выполняют более поздние, как правило, мелкие трещины, образованные в результате новых импульсов тектонических деформаций в кварцевых прожилках и жилах, включая кварц-карбонатную Магистральную, залежах березитов, в том числе массивных, и в минерализованных зонах.

Каркас обсуждаемых предрудных круто- и пологопадающих структурных элементов золоторудной зоны отвечает совокупности сопряженных оперяющих стволовые разломы трещин скола и отрыва, моделируемых в экспериментах. Механизм образования этого каркаса не соотносится с масштабами (не зависит от масштабов) образуемых разрывных структур и план силового поля может быть реконструирован как на уровне мелкой трещиноватости, так и сравнительно крупных разломов. Покажем это на конкретных примерах.

В реконструкции силового поля в качестве исходной посылки следует принять как очевидный факт то, что образование пологих (субгоризонтальных) структур отрыва в обрамлении оперяемого разлома возможно в случае приложения растягивающих усилий, ориентированных вверх, в направлении наименьшего механического (гравитационного) сопротивления среды. Представляется также очевидным, что масштабы возникающих структур определяются величиной этих усилий и гравитационным давлением вышележащих толщ, возрастающим с глубиной. В свою очередь, максимальные растягивающие направленные вверх усилия могут возникать в условиях осевого тангенциального сжатия, достаточного по мощности для возникновения стволовой структуры – оперяемого разлома или активизации существующего. Это может быть взброс, надвиг, взбросо-сдвиг, но не сброс, образующийся при горизонтальной ориентировке растягивающих усилий.

Схема реконструкции силового поля на рудном этапе образования выполненных поздними продуктивными рудно-минеральными ассоциациями мелких пологих трещин отрыва в массивных ранних березитах (максимум IV) приведена на рис. 4. Ориентированные вверх максимальные растягивающие усилия здесь (ось σ_3), достаточные для образования этих трещин, возникали при направлении оси тангенциального сжатия (σ_1) по нормали к сместителю Главного Сюльбанского разлома-взброса и/или под острым углом к нему. В последнем случае возникала сдвиговая составляющая, северо-северо-западное направление которой на предрудном этапе функционирования разлома подчеркивается приоткрыванием и заполнением кварцем субмеридиональных и северо-восточных, но не северо-северо-западных участков субпараллельных ему оперяющих разломов II порядка. Разрядка усилий сжатия осуществлялась также образованием типовых, получаемых в эксперименте, трещин скола, согласных сместителю (максимум I) и имеющих встречное ему крутое падение (максимум III).

Усложнение морфологии продуктивной жильно-прожилковой минерализации в Магистральной

жиле на Золотом участке (рис. 3) сравнительно с приведенной ситуацией строго эшелонированных «лестничного» типа мелких жил в массивных березитах в висячем боку разлома обусловлено, скорее всего, тем, что внутри Главного Сюльбанского разлома на участке его виргации происходило более интенсивное менее упорядоченное нарушение сплошности (дробление) кварц-карбонатного субстрата при разрядке сдавливающих усилий посредством перемещения боков разлома. Здесь слабо выражена тенденция к сохранению плана деформаций сравнительно с условиями висячего бока разлома.

Аналогичную структуру силового поля, но для предрудного этапа формирования структуры, мы получим, если заменим мелкие пологие трещины отрыва и крутопадающие трещины скола на диаграмме 1 соответственно мощными пологими зонами дробления Верхне-Каралонского и Еленинского участков и крутопадающими субпараллельными разломами и зонами рассланцевания II порядка, оперяющими Главный Сюльбанский и Каралонский разломы и вмещающими ранние минеральные ассоциации [5. Рис. 5]. Однако тот факт, что подобные мощные эшелонированные по вертикали субгоризонтальные структуры отрыва (зоны раздвига) не обнаружены в Уряхском рудном поле и, вероятно, отсутствуют, свидетельствует о дифференциации усилий сжатия и, как следствие, усилий растяжения по простиранию Сюльбанской зоны. Наиболее мощные усилия сжатия-растяжения создавались на запад-северо-западном окончании Сюльбанской зоны глубинных разломов, и эти усилия ослабевали южнее, по мере изменения простирания разломов на северо-северо-западное.

Образование пологих структур отрыва преимущественно в висячих боках Главного Сюльбанского и Каралонского разломов объясняется не только более высокой вероятной их активностью, которая вообще свойственна разломам [6], но и структурой толщи углеродистых сланцев в лежачем боку Главного Сюльбанского разлома. Обилие здесь крутопадающих зон межслоевого, внутрислоевого и секущего рассланцевания препятствует концентрации растягивающих усилий на субгоризонтальных поверхностях – эти усилия гасятся вследствие перемещения пластин пород вдоль направленных вверх усилий растяжения по субпараллельным им швам рассланцевания. Здесь неизвестны системы даже мелких трещин отрыва (диаграммы 3–8, рис. 5). Метавулканиты келянской толщи в этом отношении более благоприятны, так как они в основном слабо рассланцованы (массивны), поэтому в них образованы мощные субгоризонтальные зоны раздвига, например, на Еленинском участке. Но в интенсивно рассланцованных согласно ориентировке толщи метавулканитах, как и в углеродистых сланцах, также не возникают даже мелкие пологие трещины отрыва (диаграмма 2, рис. 5).

Постоянное присутствие во всех породах трещин скола субширотного, северо-восточного простирания отражает существование поперечных к рудовмещающим структурам разломов, которые, вероятно, влияли на распределение минерализации. В Каралонском рудном поле известны поперечные пояса даек долеритов, в сопряжении которых с рудоносными зонами фиксировались наиболее богатые руды (устное сообщение Г.И. Грабко). Однако большинство поперечных нарушений пока не вскрыто.

Образование на предрудном и рудном этапах одних и тех же систем разломов и трещин, – ранних, вмещающих в основном березиты, кварц и ранние карбонаты, поздних, выполненных продуктивной кварц-карбонат-сульфидной минерализацией, доказывает пульсационный режим и сохранение плана тектонических деформаций на обоих этапах, усиление и ослабление сжимающих и растягивающих усилий. Этот факт отражает динамику структурной подготовки и структурного сопровождения рудообразующего процесса в Сюльбанской золоторудной зоне в позднепалеозойскую эпоху ее эволюции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Гос. контракт № П238 от 23.04.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riedel W. Das Aufguellen geologischer Schnelzmassen als plastischer Formanderungsvorgang // Neues Jahrbuch für Miner., Geol. und Paleont. – 1929. – Bd. 62. – Abt. B. – S. 151–170.
2. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // Zentralbl. für Mineralogie. Abt. Geol. und Paleont. – Berlin, 1929. – S. 354–368.
3. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхозин А.В. Структурно-динамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 1. Берикульское месторождение (Кузнецкий Алатау) // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 12–26.
4. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхозин А.В. Структурно-динамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторождение Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 23–38.
5. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю. Структурно-динамические режимы образования золото-сульфидно-кварцевой минерализации в Сюльбанской золоторудной зоне (бассейн среднего течения реки Витим). Ч. 1. Каралонское рудное поле // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 29–35.
6. Великий А.С. Структуры рудных полей (в складчатых областях). – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1961. – 276 с.

Поступила 19.09.2011 г.

УДК 553.411.071.242.4+550.4

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ ОКОЛОРУДНОГО МЕТАСОМАТИЗМА В ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СУХОЙ ЛОГ (ЛЕНСКИЙ РАЙОН). Ч. 2. ПЕТРОЛОГИЯ ОКОЛОРУДНОГО МЕТАСОМАТИЗМА

И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко*, А.В. Верхозин*

Томский политехнический университет
E-mail: kucherenko.o@sibmail.com
*ООО «Ленская золоторудная компания», г. Бодайбо
E-mail: Martynenko VG@polyusgold.com

Приведены результаты реконструкции минералого-петрохимической зональности рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Сухой Лог. Обосновывается принадлежность ореола к березитовой метасоматической формации в сочетании ее с пропилитовой. Обсуждаются особенности околорудного метасоматизма в черных сланцах.

Ключевые слова:
Сухой Лог, месторождение, черные сланцы, петрологические, геохимические исследования, проблемные вопросы.

Key words:
Sykhoi Log, deposit, black shales rocks, petrologic, geochemic research, problem questions.

Введение

Как было показано в [1], с проблемой источников рудного вещества в месторождении Сухой Лог органически связана также дискуссионная проблема происхождения метасоматического ореола с его жильно-прожилково-вкрапленной золото-сульфидно-карбонатно-кварцевой минерализацией. Диапазон мнений включает ранние представления о принадлежности метасоматитов к березитам и генетической связи гидротермального рудообразующего процесса с гранитоидным магматизмом, более позднюю наиболее популярную до сих пор квалификацию гидротермальных изменений сланцев как следствие регионального метаморфизма на регрессивном его этапе в рамках метаморфогенно-гидротермальной концепции рудообразования и отрицание гидротермальных изменений вообще.

При сравнительном изучении геологической истории горных пород и металлов в них в ряде золоторудных полей юго-восточного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, образованных в черносланцевом и несланцевом субстрате, с использованием методических приемов принятой методологии петролого-геохимических исследований [1–3] получена петрологическая информация, использование которой полезно, чтобы понять, в чем и в какой степени рудовмещающие метасоматиты Сухого Лога специфичны в сравнении с типовыми универсальными чертами метасоматических ореолов других мезотермальных месторождений, и насколько справедливо противопоставление этого месторождения другим, считающимся магматогенно-гидротермальными.

Обращается внимание на то, что порядок минеральной зональности и направленность, сущность преобразований минералого-химического состава пород в минеральных зонах апосланцевых метасоматических ореолов согласуются с таковыми в рудных полях, образованных в любом другом субстрате, а минеральные зоны околорудных метасоматических ореолов аналогичны субфациям «регрессивного регионального метаморфизма»: биотит-хлоритовая субфация отвечает фронтальной зоне, хлорит-серицитовая – хлоритовой (эпидот-хлоритовой), альбит-серицитовая – альбитовой, серицит-карбонатная – тыловой (березитовой) [2, 3].

Каких-либо промежуточных минеральных ассоциаций, образованных после регионального метаморфизма нагревания (мусковит-биотитовой с турмалином, альмандин-биотитовой, альмандин-диопсидовой и других), но до начала околорудного метасоматизма в сланцевых толщах региона не обнаружено. Поэтому дискуссия о слабости или интенсивности околорудных изменений в черных сланцах и о сходстве-различии минеральных ассоциаций регионального регрессивного метаморфизма и околорудного метасоматизма по крайней мере в золоторудных районах носит по существу терминологический характер: различными терминами обозначается одно и то же. Субфации «зеленосланцевого регрессивного метаморфизма» и соответствующие им минеральные зоны околорудных метасоматических ореолов – это следствие одного процесса – крупнообъемного, но относительно локального сопровождаемого рудообразованием метасоматизма.

Поскольку мы имеем дело в сланцах с околорудным метасоматизмом в его конкретном формационном выражении, представляется корректным использовать терминологическую базу, применяемую при исследованиях метасоматических формаций с их зональными ореолами, в обсуждаемых месторождениях сложенными метасоматитами тыловой (березитовой) и периферийных (пропилитовых) зон. Это целесообразно сделать и по другим причинам. «Регрессивный метаморфизм» – это не изохимический процесс, каковым по определению должен быть метасоматизм, – процесс аллохимический.

В наше время по-прежнему называть аллохимический гидротермальный процесс метаморфизмом

– это нонсенс. Гидротермальный метасоматизм на «регрессивном этапе регионального метаморфизма», как правило, происходит через сотни или многие сотни млн лет после прогрессивного собственно регионального зонального метаморфизма, овеществленного в минеральных зонах, занимающих обширные пространства со стабильными минеральными составами. Минеральные зоны позднего метасоматизма, в том числе сопровождаемого оруденением, контролируются иными и более локальными структурами, чем минеральные зоны прогрессивного регионального метаморфизма. Поздний метасоматизм не связан с последним причинно-следственными связями, о чем можно судить по ряду признаков – значительным временным интервалам, отделяющим один процесс от другого, происхождению флюидов и другим.

С учетом приведенных соображений к наиболее низкотемпературной фации зонального регионального метаморфизма нагревания, в частности, черносланцевых толщ Бодайбинского и Мароканo-Илигирского прогибов следует относить регионально распространенные породы, содержащие мусковит-биотитовый метаморфический парагенезис, а все более низкотемпературные ассоциации, на него наложенные (хлорит, эпидот, альбит и пр.), квалифицировать как производные позднего гидротермального метасоматизма, большей частью не имеющего отношения к предшествующему региональному метаморфизму. По существу, эта идея овеществлена выделением региональных метасоматических формаций [4].

Вместе с тем, при стандартной минералого-петрохимической зональности апочерносланцевых околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов тыловая березитовая и смежная с ней альбитовая зоны с окислением в них керогена и, как следствие, осветлением пород до нормальных светло-серых березитов и березитоидов (с альбитом) образованы эпизодически. Они слагают и обрамляют некоторые минерализованные зоны прожилково-вкрапленных золото-сульфидно-кварцевых руд и образуют мощные, до десятков метров, залежи массивных метасоматитов с прожилково-вкрапленной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией. Напротив, в экзоконтактах подавляющего большинства крупных золотоносных кварцевых жил и множества мелких прожилков сланцы не осветлены и изменены на уровне разных зон. Очевидно, требуются поиски причин и объяснение этой особенности околорудного метасоматизма в черных сланцах.

В связи с сохраняющимся состоянием неопределенности в проблеме обусловленности околорудного метасоматизма и рудообразования в месторождении Сухой Лог более масштабным геологическим процессом выполнено петрологическое исследование рудовмещающего субстрата, которое опирается на описанный альтернативный подход. Материалом послужил керн скважин, пройденных на Западном участке месторождения, детально (0,2...2,0 м) опробованный вкрест простирания рудовмещающих толщ и метасоматического ореола. Получены альтернативные существующим представлениям результаты, которые приведены и обсуждаются в статье.

Краткий очерк геологического строения Западного участка месторождения Сухой Лог

Месторождение Сухой Лог находится на севере Иркутской области в центральной части Бодайбинского района в пределах Витимо-Патомского нагорья.

Западный участок месторождения приурочен к западной части Сухоложской антиклинали, сложенной переслаивающимися филлитовидными сланцами, алевролитами, тонко-мелкозернистыми песчаниками верхней подсвиты хомолхинской свиты и нижней подсвиты имняхской свиты позднего рифея. Рудовмещающая складка вытянута в субширотном направлении, имеет асимметричное строение и запрокинута на юг. Северное и южное крылья антиклинали падают под углами 15...20 и 30...45° соответственно. Складка осложнена мелкими флексурами, нарушениями высоких порядков (взбросы, надвиги и др.), которые и являются структурами, вмещающими основную часть оруденения. Рудные минерализованные зоны Западного участка являются продолжением рудных залежей центрального участка и также залегают в обрамлении Кадали-Сухоложского глубинного разлома.

Породы содержат углеродистое вещество до 3,5 мас. %, подверглись региональному метаморфизму и гидротермально-метасоматическим преобразованиям. Основная масса золота связана с жильно-прожилково-вкрапленной карбонатно-сульфидно-кварцевой минерализацией. Сульфиды представлены пиритом, пирротином с примесью халькопирита, галенита, сфалерита. Руды содержат также микропримеси нескольких десятков минералов, в основном сульфидов [5].

Рудные тела характеризуются субпослойным залеганием. Они имеют сложную конфигурацию с частыми раздувами, достигающими десятков метров, пережимами, выклиниванием и разветвлением на несколько минерализованных зон. От осевой части антиклинали к ее крыльям прослеживается закономерное снижение содержания золота от промышленных концентраций до фоновых значений. Распределение золота в рудных телах крайне неравномерно. Средняя проба золота на месторождении составляет 879 ‰.

Минеральная зональность околорудного метасоматического ореола

Как следует из приведенных в [1] материалов, минеральный состав околорудно измененных пород месторождения Сухой Лог изучен детально с использованием современной диагностической и аналитической аппаратуры. Вместе с тем, не достигнуто единого понимания происхождения но-

вообразованных минеральных ассоциаций, то есть сущности геологического процесса, инициировавшего и обусловившего гидротермальные изменения сланцев в околорудном пространстве и в рудных телах. Полная картина строения (минеральной зональности) рудовмещающего метасоматического ореола Сухого Лога до сих пор не создана.

Между тем, ореол месторождения структурирован в соответствии с типовой универсальной, то есть приложимой и к апочерносланцевым околорудным метасоматическим ореолам схемой, приведенной в [2, 3]. От других он отличается гигантскими размерами, значительно превышающими размеры составляющих часть его объема рудных залежей, но не внутренним устройством. Даже на Западном участке месторождения с относительно небольшими рудными телами и сопровождающими минерализованными зонами на обширной площади скважинами вскрыты только две минеральные зоны – альбитовая, вмещающая промышленную рудную минерализацию, и смежная с ней хлоритовая. Околорудные метасоматические изменения кончаются на значительном удалении от рудных тел. Сменяющая хлоритовую зону на периферии обширная область слабых изменений в типовой схеме названа фронтальной, и от хлоритовой зоны она отличается по минеральному составу. Породы, слагающие фронтальную и тыловую зоны, описаны предшественниками. С использованием их результатов рудовмещающий ореол Сухого Лога реконструирован в полном объеме.

Состав минеральных новообразований этапов регионального метаморфизма и околорудного метасоматизма принципиально отличается.

Как известно, Сухой Лог и соседние месторождения залегают в терригенных и терригенно-карбонатных сланцах, представляющих обширную мусковит-биотитовую зону ареала регионального метаморфизма нагревания, занимающую значительную часть территории Бодайбинского и Мамакано-Илигирского прогибов, которая сменяется зонами с более высокотемпературными и высокобарическими минеральными ассоциациями в составе ультраметаморфитов на окраинах и в обрамлении прогибов – Нечерском, Тонодском и других поднятиях очагово-купольного типа.

За пределами и во фронтальной зоне околорудного метасоматического ореола месторождения в процессе регионального метаморфизма, охватившего отложения обоих прогибов в венде, терригенные и карбонатно-терригенные массивные, скрыто сланцеватые и сланцеватые породы обеих свит сохранили в основном первоначальное обломочное и слойчатое строение, а также полевошпат-кварцевый и полимиктовый состав обломочной фракции. Напротив, глинистый и известковый (глинисто-известковый) цемент осадков подвергся раскристаллизации с образованием зернистых агрегатов кальцита, биотита, мусковита и, вероятно, серицита, парагонита, турмалина при эпизодическом участии незначительной примеси метакристаллов роговой обманки. Этот метаморфический комплекс одновременно образованных минералов не несет признаков взаимных замещений и квалифицирован как минеральный парагенезис, более или менее равномерно распределенный на территории обоих прогибов.

На первично осадочный и регионально-метаморфический парагенезисы в рудоконтролирующих, рудовмещающих разломно-трещинных структурах и их обрамлении после значительного (250 млн л) [6] временного перерыва наложен обширный набор минералов позднепалеозойского [5] этапа околорудного метасоматизма и рудообразования.

Обобщенная схема минеральной зональности рудовмещающего метасоматического ореола месторождения в составе минеральных зон включает следующие новообразованные минералы (подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловой зоне).

Фронтальная зона [7]: Песчаники	кварц+серицит+альбит+эпидот+хлорит+пирротин; исходные кварц, олигоклаз, роговая обманка
Фронтальная зона [8]: Песчаники	кварц+серицит+альбит+доломит+сидерит+эпидот+хлорит; исходные кварц, андезин, микроклин, роговая обманка
Фронтальная зона [9]: Песчано-, алевросланцы догалдынской и хомолхинской свит	кварц+серицит+кальцит+доломит+эпидот+хлорит; исходные кварц, полевые шпаты, кероген, мусковит, биотит
Хлоритовая зона: Песчано-, алевросланцы имняхской и хомолхинской свит	кварц+серицит+рутил+лейкоксен+магнетит+пирит±кальцит+анкерит±сидерит+альбит+хлорит
Альбитовая зона:	кварц+серицит+рутил+лейкоксен+магнетит+пирит±кальцит+анкерит±сидерит+альбит
Тыловая зона [7]:	кварц+серицит+рутил+пирит+анкерит+сидерит
Тыловая зона [8]:	кварц+серицит+кальцит+анкерит
Тыловая зона [9]:	кварц+серицит+рутил (лейкоксен) +пирит+Mg-Fe карбонаты+апатит
Тыловая зона [10]:	кварц+мусковит+пирит+анкерит+сидерит

Фронтальной зоне мощностью предположительно до многих сотен метров свойствен полный набор перечисленных в метасоматической колонке минералов, но в незначительном объеме, не превышающем, как правило, 20...30 об. %. Породы подверглись частичной перекристаллизации с образованием лепидогранобластовой структуры, усложняющей обломочную структуру исходных пород. Биотит, роговая обманка в разной степени замещены хлоритом, хлорит – серицитом-мусковитом в срастании с рутилом, лейкоксеном, кальцитом, магнезиально-железистыми карбонатами. Зерна плагиоклазов частично серицитизированы, с периферии подверглись деанортизации в виде узких каемок альбита. В обломках основного состава диагностируется эпидот.

На границе полного замещения биотита и/или роговой обманки фронтальная зона сменяется более тыловой хлоритовой (редко эпидот-хлоритовой) зоной.

В хлоритовой зоне все породы полностью перекристаллизованы, но унаследовали алеврито-мелкопесчаную (до 0,25 мм) размерность зерен.

Породы темно-серые до черных массивные или тонкослойчатые, как правило, со слабо выраженной слойчатостью, обусловленной чередованием в разных сочетаниях существенно кварцевых, карбонатных, мусковит-серицитовых слойков мощностью до первых...многих мм. Слойчатость горизонтальная, иногда косая. Массивные породы чередуются со скрыто сланцеватыми, которые внешне выглядят массивными, но раскалываются на плитки. В скрыто сланцеватых породах зерна основных минералов – кварца, карбонатов вместе с чешуйками серицита-мусковита имеют удлиненную форму с соотношением сторон от 1:2...3 (кварц, карбонаты) до 1:10 (серицит-мусковит). Чешуйки и зерна ориентированы удлинением в одном направлении – вдоль сланцеватости и в согласии со слойчатостью. В массивных породах зерна более или менее изометричные, чешуйки слюды ориентированы беспорядочно.

Структура пород лепидогранобластовая, гранолепидобластовая, существенно лепидобластовая в метааргиллитах (филлитах), пойкило-порфиробластовая.

Ведущие минералы пород – кварц, карбонаты, серицит (+мусковит), присутствующие в разных количественных соотношениях. Содержания каждого из них изменяются от несущественной (1...2 об. %) примеси до заметного преобладания над другими. В качестве постоянной несущественной примеси присутствуют хлорит, кероген, турмалин, полевые шпаты, пирит (сульфиды), рутил, лейкоксен. Большинство перечисленных минералов образовалось до и в процессе метасоматизма.

Основная масса кварца, слагающего зернистые агрегаты в слойках-полосках, автономные или в срастаниях с другими минералами, имеет седиментогенно-метаморфическое происхождение. Его зерна имеют обычно сложную конфигурацию, резкие или «лапчатые» и в последнем случае «размытые» очертания. Вместе с тем, кварц присутствует в форме линзовидных порфиробласт, удлиненных вдоль полосчатости и/или сланцеватости, размером до 1,5...2,0 мм и с крупнозернистым (0,5...0,7 мм) строением, иногда в срастании с хлоритом и карбонатом. Кварц в таких «глазках» охотно аккумулирует каплевидные выделения сульфидов, в основном пирротина, и мелкие метакристаллы пирита. Кварц также участвует в пойкилитовых включениях в крупных (до 5 мм) метакристаллах-порфиробластах карбоната, представленного, согласно диагностике [11], исключительно магнезиосидеритом. Кварц присутствует в виде включений в метакристаллах-порфиробластах пирита и хлорита.

Обычны агрегаты «пламеневидных» зерен кварца в обрамлении метакристаллов-порфиробласт пирита, часто не по всему периметру, ориентированных удлинением нормально к его граням. В срастаниях с хлоритом в таких полосках обрамления кварц занимает тыловую зону, смежную с пиритом, а хлорит в удлиненных («пламеневидных») чешуйках, согласных с «пламеневидными» выделениями кварца и во взаимных прорастаниях с ними, занимает преимущественно периферию обрамления. В других случаях удлиненные чешуйки хлорита ограничивают с периферии обрамляющие метакристаллы пирита полоски «пламеневидного» кварца на всем протяжении граней пирита, но ориентированы удлинением вдоль граней и непрерывно следуют последним синхронно с изменением их ориентировки на 90°. В оторочках обрамления метакристаллов пирита кварц также обычен в срастаниях с удлиненными зернами анкерита.

Карбонаты в соразмерных кварцу зернах и полных кристаллах участвуют в сложении основной массы породы и присутствуют в форме кристаллов-порфиробласт. Зернам свойственны неправильные очертания, но обычны и ромбовидные срезы с острыми углами. Среди этих карбонатов диагностированы кальцит (редко, вероятно, реликты седиментогенно-метаморфического кальцита), а повсеместно – анкерит [11] (табл. 1).

Таблица 1. *Минеральный состав околорудно измененных углеродистых карбонатно-терригенных сланцев имняхской свиты (по данным рентгеновского анализа)*

Номера проб	Минеральные зоны околорудного метасоматического ореола	Диагностированные минералы
76–3-163,0	Хлоритовая	Анкерит, кварц, мусковит, плагиоклаз, хлорит
76–3-168,8	Хлоритовая	Анкерит, кварц, хлорит, мусковит, плагиоклаз, пирит
82–11–65,7	Хлоритовая	Анкерит, кварц, кальцит, мусковит, плагиоклаз, хлорит
75–2-32,1	Альбитовая	Анкерит, кварц, плагиоклаз, мусковит
76–3-62,4	Альбитовая	Анкерит, кварц, плагиоклаз, кальцит, мусковит
76–3-62,7	Альбитовая	Анкерит, кварц, плагиоклаз, мусковит
76–3-133,7	Альбитовая	Анкерит, кварц, мусковит, плагиоклаз
76–3-134,3	Альбитовая	Анкерит, мусковит, кварц, плагиоклаз, пирит

Примечание. 1) Подчеркнуты преобладающие минералы. 2) Анализ выполнен в Аккредитованной испытательной лаборатории ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр» (г. Новокузнецк), аналитик Г.М. Тираков. Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЯ.07.

В метакристаллах-порфиробластах размером до 5 мм линзовидной формы («глазках») диагностирован, как отмечалось, магнезиосидерит [11].

Удлинением «глазки» ориентированы согласно сланцеватости пород и сосредоточены в полосах мощностью до нескольких десятков метров, чередующихся в разрезе. Порфиробласты часто имеют «рваные» контакты, разорваны на части, погасающие при включенном анализаторе одновременно, следовательно – представляющие один кристалл. Содержание порфиробласт не превышает 20 об. % от объема пород. Содержат многочисленные пойкилитовые включения мелких (до 0,1 мм) ромбоэдров анкерита, зерен кварца, чешуек серицита и хлорита, микропризм желто-бурого турмалина, скоплений керогена, микровключений пирита. Некоторые порфиробласты пересекаются полосками (прожилками) керогена.

Серицит-мусковит присутствует в двух разновидностях при том, что сравнительно крупных пластинок, более 0,1...0,2 мм, мало. Чистые пластинки мусковита с размерностью до 0,5 мм представляют реликты метаморфического мусковита, как, впрочем, и часть серицита. Мусковит, который замещает хлорит и представляет конечный минерал в цепочке биотит–хлорит–мусковит, «загрязнен» примесью рутила-лейкоксена, образованных в связи с высвобождением титана из биотита и фиксацией его в промежуточном хлорите.

Основная масса мусковита серицитовой размерности представлена рассеянной разной густоты вкрапленностью различно ориентированных чешуек, или сосредоточена в полосках мощностью от долей мм до многих мм, чередующихся с полосками кварц-карбонатного состава. В этом случае многочисленные чешуйки его в моно- или поликомпонентном агрегате ориентированы в одном направлении согласно общей полосчатости пород, погасая при включенном анализаторе одновременно как единый кристалл. При этом зерна окружающих минералов не всегда уплощены. Очевидно, серицит более чувствителен к давлению, при раскристаллизации цемента осадочных пород или перекристаллизации ориентируясь удлинением своих чешуек поперек направления сжимающих усилий. В полосках минерал не всегда, но охотно ассоциирует с керогеном, образуя совместные агрегаты с переменным содержанием компонентов.

Магнезиально-железистый с примесью (до 0,5 %) Ni [12] хлорит, помимо описанных срастаний с другими минералами, обычно присутствует в форме удлиненных или субизометричных метакристаллов-порфиробласт и агрегатов чешуек размером до 0,5 мм. Иногда порфиробласты хлорита имеют ромбовидную форму, напоминающую фрагменты кристаллов роговой обманки. Содержание его не превышает 3 об. %. Порфиробласты хлорита, как правило, занимают секущее положение по отношению к ориентировке чешуек серицита-мусковита и удлиненных зерен других минералов. Содержат многочисленные включения кварца, карбонатов, серицита, при этом в разной степени замещены мусковитом.

Призматические кристаллы турмалина грязно-зеленого и желто-бурого цветов, как правило, сочетающихся в одном кристалле, более или менее равномерно рассеяны в породах и достигают размера 0,3...0,4 мм, хотя в большинстве пород размер их не превышает 0,1 мм. Обычно наблюдаемая независимость распределения минерала от интенсивности метасоматических преобразований пород при отсутствии признаков окатанности его идиоморфных кристаллов рассматривается как результат образования при региональном метаморфизме. Вместе с тем, обнаружены факты, которые указывают на неодноактное образование турмалина. Заполняющий промежуток между соседними метакристаллами пирита прожилок мощностью 0,1 мм сложен агрегатом взаимно прорастающих «пламеневидных» зерен кварца и чешуек хлорита, ориентированных, как обычно, нормально к граням пирита. Удлиненный метакристалл турмалина с соотношением сторон 1:7 пересекает прожилок и прилегающие к нему области обоих метакристаллов пирита, углубляясь в каждый из них на расстояния до 0,2 мм без признаков смещения. Это срастание доказывает более позднее сравнительно с кварц-хлоритовым прожилком и пиритом образование турмалина, то есть послеметаморфическую его генерацию. С этим фактом согласуется другой – эпизодически наблюдаемое увеличение количества микрокристаллов турмалина в альбитовой зоне сравнительно с хлоритовой.

Распределение керогена в породах чрезвычайно неравномерное при содержании в полосках или участках сгущения до 10 об. % и, вероятно, более. Особенно охотно кероген кооперируется с серицитом, участвуя в сложении совместных полосок или чередуясь с ними. В самом общем виде существует обратная зависимость содержания керогена от размерности зерен, – чем более тонкозернистая порода, тем выше содержание керогена. При этом, фиксируются слюдистые аргиллиты – филлитовидные сланцы и не содержащие или почти не содержащие кероген.

Полоски керогена мощностью в тысячные доли мм до первых мм имеют сложную конфигурацию, – они волнистые, с флексурными перегибами, ветвятся, огибают зерна кварца и полевых шпатов, образуют неправильные сетки, но часто пересекают порфиробласты сидерита. Обычна также вкрапленность, гнездовые выделения керогена, как и в полосках разной густоты – от рассеянной до сплошной. С использованием рентгено-структурного анализа кероген диагностирован как неструктурированное графитоподобное вещество или неупорядоченная форма графита с незначительной примесью хлороформенных и спиртобензольных битумоидов [10].

Состав керогена и его происхождение детально изучались ранее [13 и др.].

Полевых шпатов сравнительно мало (до 5...10 об. %). Среди них диагностированы реликтовые плагиоклазы, подвергшиеся в разной степени

альбитизации и структурной перестройке, вследствие чего, вероятно, частично утратившие полисинтетическое двойникование. О частичном замещении кристаллов плагиоклазов кварцем свидетельствуют «размытые» границы между ними. Вместе с тем, преобладают кристаллы новообразованного альбита.

Разнообразны формы соотношений с другими минералами сульфидов, среди которых резко преобладает пирит в агрегатах зерен и в метакристаллах размерами от долей мм до 50 мм в поперечнике. Обычен также пирротин в агрегатах ксеноморфных зерен. Принадлежность большей части сульфидов к этапу метасоматизма и рудообразования доказывается увеличением их массы и расширением номенклатуры по мере усиления метасоматических преобразований пород при переходе от хлоритовой к альбитовой зоне.

Метакристаллы пирита, как отмечалось выше, сопровождаются оторочками новообразованного кварца, иногда в срастании с хлоритом, карбонатами, как правило, не по всему периметру. В тех участках периметра, где оторочки кварца отсутствуют, в экзоконтактах метакристаллов пирита также отсутствуют какие-либо видимые изменения минералов, отличные от основной массы пород. В других случаях в обрамлении метакристаллов пирита или агрегатов пирита, пирротина можно наблюдать укрупнение до многих десятых долей мм зерен кварца, карбонатов, чешуек слюд, до 0,3...0,4 мм призм турмалина, объединенных в порфиробласты, как правило, линзовидной или короткопрожилковой формы, достигающие размеров по удлинению 4...5 мм. Вместе с тем, в некоторых подобных порфиробластах сульфиды отсутствуют.

В более тыловой альбитовой зоне, лишенной хлорита, сохраняются, как и в хлоритовой зоне, кварц, чистый мусковит, турмалин, кероген исходных для околорудного метасоматизма осадочных регионально метаморфизованных пород, а также при сохранении их текстур и структур все, кроме хлорита, минералы этапа метасоматизма и рудообразования. Вместе с тем, отмечается локальное осветление пород до серого, светло-серого цвета. Границы осветленных участков резкие (волосовидные), часто имеют причудливую конфигурацию, пересекают полосчатость и согласную ей сланцеватость пород. Объемы осветленных метасоматитов незначительны – ширина осветленных участков на поверхности керна, как правило, не превышает десятков см. Осветление пород обусловлено уменьшением содержания керогена вследствие, вероятно, его окисления.

Пород, представляющих тыловую зону, в районе Западной залежи рудного поля, нами пока не обнаружено, поэтому воспользуемся данными предшественников. Как отмечалось выше, наиболее измененные породы рудного поля зафиксированы в центральной его части в районе Главной рудной залежи и сложены кварцем, мусковитом, серицитом, Mg-Fe карбонатами с примесью рутила (лейкоксена) и с переменным количеством сульфидов, в основном пирита [7–9, 14, 15]. Этот состав подтвержден в последнее время [10] и естественным образом, хотя и в ограниченном объеме, формируется, согласно теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского, вследствие перехода в подвижное состояние очередного элемента – натрия и растворения очередного минерала, в данном случае альбита, при переходе в более тыловую минеральную зону метасоматического ореола, которая и завершает метасоматическую колонку.

Порядок минеральной зональности нарушается многократным чередованием хлоритовой и альбитовой минеральных зон вследствие усиления гидротермальных изменений пород вдоль оперяющих «стволовые» рудовмещающие разломы зон дробления и рассланцевания – структур повышенной проницаемости. Весьма вероятно, что по примеру других месторождений тыловая зона также участвует в этом чередовании. Мощность минеральных зон в таких частях разреза рудовмещающего метасоматического ореола снижается до первых...многих метров. Поскольку промышленная минерализация приурочена к альбитовой и тыловой минеральным зонам, что доказывается отсутствием хлорита и незначительным содержанием альбита в рудных технологических пробах [16], в обрамлении наиболее крупных рудных залежей присутствуют относительно маломощные (метры) минерализованные зоны, сложенные метасоматитами альбитовой зоны с продуктивной золото-кварц-сульфидной и золото-сульфидной минерализацией.

Петрохимические черты околорудного метасоматического ореола

При дефиците пригодных для химического силикатного анализа невыветрелых образцов исходных осадочных пород можно, тем не менее, констатировать, что межзональные изменения химического состава пород в метасоматическом ореоле выражаются в существенном возрастании (вдвое...втрое) массы магния и железа в процессе охватившего значительные объемы рудовмещающих толщ магнезиально-железистого метасоматизма и замещения кальцита известкового цемента осадочных метаморфизованных пород анкеритом – главным карбонатом метасоматически измененных пород. Содержания в исходных осадочных породах магния, например, на уровне 1...2 мас. % [17], в метасоматитах хлоритовой и альбитовой зон увеличиваются до 3,5...4 мас. % (табл. 2). Вместе с тем, вероятно поступление с растворами углекислоты в малокарбонатные породы хомолхинской свиты, поскольку содержание анкерита в образованных по ним метасоматитах сопоставимо с количеством анкерита в метасоматитах, образованных за счет карбонатно-терригенных сланцев имняхской свиты.

Таблица 2. *Химические составы гидротермально измененных углеродистых алевро-песчаносланцев и апосланцевых метасоматитов рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Сухой Лог*

Минеральные зоны, номера проб	Содержание, мас. %															Σ
	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	S*	CO_2	CaO	MgO	FeO	Fe_2O_3	TiO_2	P_2O_5	MnO	H_2O+	H_2O	
Имняхская свита, R_3. Исходные – метаморфические двуслюдяные полевошпат-кварцевые карбонатно-терригенные сланцы алевро-мелкопесчаной размерности																
Хлоритовая																
60-6-338,0	45,20	9,62	2,00	1,00	0,053	16,17	16,05	3,15	3,95	0,46	0,60	0,13	0,09	–	–	98,47
60-6-338,5	53,70	10,60	2,02	0,96	0,011	10,90	9,96	3,40	4,53	0,78	0,66	0,13	0,07	–	–	97,72
82-11-36,0	58,93	9,81	1,50	1,48	0,046	9,13	9,30	3,49	3,88	0,52	0,64	0,14	0,06	–	–	98,93
82-11-60,3	51,99	10,72	1,93	1,31	0,011	11,00	11,32	3,52	4,42	0,48	0,65	0,12	0,05	–	–	97,52
82-11-65,7	48,50	9,04	1,69	1,47	0,057	15,63	15,86	3,00	3,09	0,28	0,64	0,14	0,05	–	–	99,45
Среднее	**51,66**	**9,96**	**1,83**	**1,24**	**0,04**	**12,57**	**12,50**	**3,31**	**3,97**	**0,50**	**0,64**	**0,13**	**0,06**	**–**	**–**	**98,41**
76-3-163,0	47,48	9,50	1,90	1,08	**2,46**	12,84	8,25	3,94	6,97	4,26	0,55	0,15	0,12	–	–	99,50
76-3-165,3	40,65	13,63	2,70	1,48	**2,51**	10,67	6,14	3,99	11,13	4,51	0,53	0,12	0,08	–	–	98,14
76-3-168,8	45,90	9,80	1,60	0,98	**4,11**	10,68	6,84	3,83	6,75	7,74	0,34	0,12	0,09	–	–	98,78
82-11-13,2	47,83	8,51	1,20	1,48	**0,15**	15,13	17,06	2,99	3,59	0,58	0,50	0,13	0,09	–	–	99,24
Среднее	**45,47**	**10,36**	**1,85**	**1,26**	**2,31**	**12,33**	**9,57**	**3,69**	**7,11**	**4,27**	**0,48**	**0,13**	**0,10**	**–**	**–**	**98,93**
Альбитовая																
60-6-336,0	51,30	10,12	2,09	1,13	0,011	14,19	11,47	3,37	4,17	0,05	0,57	0,13	0,06	–	–	98,66
60-6-339,5	59,40	10,93	1,92	1,34	0,011	7,81	6,40	3,17	4,38	0,71	0,70	0,13	0,20	–	–	97,10
75-2-32,1	62,00	8,30	1,32	1,43	0,011	10,89	7,30	2,70	4,24	0,07	0,57	0,12	0,06	–	–	99,01
76-3-62,4	55,08	8,63	1,28	1,72	0,011	13,97	11,47	2,45	3,81	0,20	0,58	0,12	0,06	–	–	99,38
76-3-62,7	59,02	9,42	1,40	1,90	0,023	11,00	8,00	3,01	4,31	0,30	0,63	0,13	0,08	–	–	99,22
Среднее	**57,36**	**9,48**	**1,60**	**1,50**	**0,013**	**11,57**	**8,93**	**2,94**	**4,18**	**0,27**	**0,61**	**0,13**	**0,09**	**–**	**–**	**98,67**
76-3-133,7	47,92	12,99	2,60	1,09	**0,46**	13,75	9,06	4,58	4,31	0,88	0,81	0,22	0,12	–	–	98,79
76-3-134,3	54,68	9,25	1,76	1,50	**0,25**	13,16	8,76	3,96	4,38	0,64	0,57	0,24	0,12	–	–	99,27
Среднее	**51,30**	**11,12**	**2,18**	**1,30**	**0,36**	**13,46**	**8,91**	**4,27**	**4,35**	**0,76**	**0,69**	**0,23**	**0,12**	**–**	**–**	**99,05**
Догалдынская свита, R_3, исходный – песчаник [9]																
Фронтальная	62,23	12,35	1,50	3,50	–	4,64	2,66	2,10	2,66	5,04	0,55	0,17	0,12	2,12	0,08	99,72
Альбитовая	46,06	22,50	3,60	3,64	–	5,28	0,56	4,00	6,47	1,84	0,94	0,30	0,06	4,78	0,24	100,27
Хомолхинская свита, R_3, исходный – песчаник [9]																
Фронтальная	80,09	5,65	1,07	0,67	–	0,32	1,40	1,12	2,02	3,12	0,08	0,58	0,06	3,38	–	99,56
Альбитовая	52,00	5,65	1,13	0,57	–	14,08	0,84	6,60	14,08	2,86	0,36	0,27	0,31	0,70	0,22	99,67

Примечание. 1) S – сера сульфидная, – не определялось. 2) Полный химический силикатный анализ проб горных пород выполнен в Аккредитованной испытательной лаборатории ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр» (г. Новокузнецк), аналитик Н.Н. Земцова. Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21АЯ.07.*

Как можно видеть в табл. 2, не обнаруживаются значимые изменения химических составов пород в смежных хлоритовой и альбитовой зонах, вмещающих Западную рудную залежь. Фиксируется только чрезвычайно неравномерное распределение восстановленной серы, отражающее распределение сульфидов, главным образом пирита. Даже в метасоматитах одной зоны оно изменяется от субкларковых значений до процентов, а по визуальной оценке в отдельных образцах – до десятков процентов.

Более дифференцированную картину демонстрируют сокращенные метасоматические колонки, представляющие центральную часть месторождения, где метасоматический рудообразующий процесс получил наиболее полное крупнообъемное выражение (табл. 2) [9]. В обеих колонках участвуют исходные умеренно- и малокарбонатные песчаники догалдынской и хомолхинской свит, а наиболее измененные породы представляют осветленные метасоматиты альбитовой зоны, состоящие из кварца, серицита, магнезиально-железистых карбонатов, альбита, рутила, сульфидов.

Согласно приведенным данным, в метасоматическом процессе кремнезем частично удалялся из пород, но увеличивалось содержание углекислоты (до 50 раз), оксидов калия (до 2,5 раз), магния (до 6 раз), суммарного железа (до 3 раз), титана (до 4 раз). Поступление фосфора зафиксировано образованием голубого и розового апатита в золотоносных кварцевых жилах [18]. Сохранение в метасоматитах натрия объясняется участием в их составе альбита при том, что установлен вынос натрия из рудной зоны, пересеченной, например, скважиной SRK97-6, при заметном привносе калия [11]. Пониженные содержания в рудах, а, следовательно, в тыловых зонах метасоматического ореола кремнезема, но повышенные – железа, магния, углекислоты, восстановленной серы и органического углерода отмечены в [16]. Обилие пирита дополняет минералого-петрохимическую характеристику процесса, который квалифицирован ав-

торами [9] как калиево-сернисто-углекислотный метасоматизм, то есть березитизация, с обогащением метасоматитов элементами фемофильной специализации (K, Mg, Fe, Ti).

Обсуждение результатов и выводы

Минералого-петрохимические черты обычного в мезотермальных месторождениях золота метасоматического процесса, называемого березитизацией, с которым идентифицировали метасоматические преобразования пород в золотых месторождениях Сухого Лога и Ленского района исследователи раннего периода изучения месторождения до начала триумфального шествия метаморфогенной гипотезы рудообразования, обобщены сравнительно давно [19] и получают подтверждение накапливающимися фактическими данными вплоть до последнего времени. Было показано, что кварц-серицит-анкеритовые с пиритом метасоматиты тыловой зоны метасоматических колонок – березиты образуются в условиях средне-низкотемпературного гидротермального калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма с частичным выносом кремнезема и заменой сильным основанием калием более слабого натрия, привносом восстановленной серы и углекислоты. Отмечалось, что остальные петрогенные компоненты мигрируют незакономерно.

Именно эти черты обнаружили в месторождении Сухой Лог один из авторов цитируемой статьи, С.Д. Шер, и исследователи более позднего времени [8, 9, 15], данные которых приведены в [1]. Всеобщее увлечение в последующие десятилетия метаморфогенно-гидротермальной гипотезой рудообразования в черных сланцах вообще и в Сухом Логу, в частности, с ее идеями породных источников золота и принадлежности рудовмещающих метасоматитов к субфациям регионального регрессивного метаморфизма положило конец употреблению термина березит.

Популярное и поныне противопоставление золотых месторождений, образованных в черных сланцах, магматогенно-гидротермальным, образованным в «кристаллическом» субстрате, опирается в том числе и на представление о принципиальных отличиях минералого-петрохимической сущности околорудных изменений в той и другой среде. Квалификация околорудного метасоматического процесса в Сухом Логу как березитизация означала бы признание еще одного факта, в дополнение к другим доказывающего геолого-генетическую однородность и этого уникального месторождения с другими, образованными, скажем, в гранитах, ультраметаморфитах, метаморфогенно-гидротермальное происхождение которым пока, как-будто, никто не приписывал, а магматогенно-гидротермальный генезис которых доказывается многими фактами [3, 20].

Минеральный состав и минералого-петрохимическая зональность рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Сухой Лог соответствуют типовым универсальным чертам околорудных метасоматических ореолов золоторудных месторождений «несланцевого» и «чернослацевого» типов пропилит-березитового профиля, описанным в [3]. Это соответствие доказывают следующие факты, характеризующие метасоматический ореол месторождения:

- сочетание в ореоле метасоматитов березитовой формации (березита и березитоида – березита с альбитом) в тыловых зонах и пропилитовой формации – в периферийных при минеральных замещениях в последних преобладающе за счет внутренних ресурсов петрогенных компонентов.
- аналогичная с ореолами других мезотермальных месторождений схема минералого-петрохимической зональности рудовмещающего метасоматического ореола;
- уменьшение числа минеральных фаз при увеличении массы минеральных новообразований от фронтальной зоны к тыловой;
- поликомпонентный кварц-серицит (мусковит)-анкерит (Mg-Fe карбонат) с пиритом (сульфидами) состав тыловой зоны ореола (березита), в том числе в жильных месторождениях, в которых осевая зона – сульфидно-карбонатно-кварцевая жила тоже поликомпонентна;
- перераспределение в тыловой зоне щелочей с заменой более сильным основанием калием более слабого основания натрия, частичный вынос из нее кремния и отложение его в форме кварца в жилах и прожилках, поступление в ореолы восстановленной серы, углекислоты;
- фемофильная специализация золотоносных березитов с образованием контрастных аномалий P, Ti, Mg, Fe, Mn, Ca в тыловых зонах наиболее активной миграции компонентов.

Отметим замечание В.Л. Русинова с соавторами [10] о том, что метасоматически преобразованные породы месторождения можно было бы отнести к березитоподобным, но нельзя этого сделать по причинам отсутствия околожильного окварцевания, типичного для березитов парагенезиса кварц+мусковит и слабо щелочного режима Na-Ca бикарбонатного раствора. Эти возражения неадекватны реальной ситуации, на которую обращал ранее внимание и сам В.Л. Русинов [21]. Поликомпонентный состав березита, как отмечалось, – обычное явление и не наблюдается оторочек окварцевания в контактах кварцевой жилы с березитом. Ассоциация кварц+мусковит, слагающая еще более тыловую, чем березит, зону, представляет в березит-пропилитовых колонках большу́ю редкость, хотя и достигается в теории.

Причины несоответствия эмпирических, наблюдаемых в природе и эксперименте данных теоретическим построениям [22] обсуждается давно, существуют разные версии на сей счет [23 и др.]. Показатель Ph растворов, как известно, меняется со временем, и ранее на примере реконструкции метасоматического процесса в черных сланцах при

образовании месторождения Чертово Корыто [24] был установлен щелочной режим ранних порций растворов, испытавших инверсию в ходе процесса в кислотный. Щелочной режим обеспечивал растворение в бескарбонатных существенно кварцевых сланцах рудовмещающей михайловской свиты кварца до 800 кг в 1 м^3 породы, вынос этой массы SiO_2 из тыловой зоны метасоматического ореола и подготовку пространства для отложения анкерита, содержание которого в местных апочерносланцевых березитах достигает многих десятков %. Последующий кислотный режим обеспечивал отложение кремнезема в жилах и прожилках. Участие в золотоносных кварцевых жилах новообразованных полевых шпатов также фиксируется, образование их связано с выносом глинозема из высокоглиноземистых боковых пород и переходом в твердую фазу вместе с кремнеземом и катионами [25].

На двух ключевых особенностях апочерносланцевых рудовмещающих метасоматических ореолов следует акцентировать внимание, поскольку эти общеизвестные особенности создают мощный импульс тому, чтобы считать золотые месторождения в черных сланцах отличными по геолого-генетическим показателям от месторождений, залегающих в других породах. Представляется, что эти две особенности сыграли решающую роль в том, чтобы отдать предпочтение метаморфизму как рудогенерирующему процессу. Первая заключается в отсутствии признаков окисления углерода керогена в экзоконтактах кварцевых жил и прожилков и существенных гидротермальных изменений в их зальбандах на уровне хотя бы альбитовой, тем более березитовой зон, вторая – в неразвитости тыловой зоны апочерносланцевых ореолов вообще.

Для объяснения первого распространенного в черносланцевых толщах многих золоторудных районов явления представляют интерес факты утяжеления изотопно легкого углерода керогена от $\delta^{13}C=-(20,0...25,0)$ ‰ до $\delta^{13}C=-(12,0...15,0)$ ‰ в новообразованных карбонатах березитов (данные Е.А. Вагиной) при обычных значениях $\delta^{13}C$ в жильных карбонатах и $\delta^{34}S$ сульфидов в кедровской и водораздельной свитах, например, близких к метеоритному стандарту ($\delta^{13}C=-7,0\pm2,0$ ‰ и $\delta^{34}S=0\pm5,0$ ‰) [26]. Вероятно, изотопно относительно тяжелый углерод с мантийными изотопными отношениями, поступавший с металлоносными растворами в тех струях общего потока, в которых возникал окислительный режим, смешивался с окислявшимся изотопно легким углеродом керогена, вследствие чего изотопные отношения углерода образовавшихся в березитах карбонатов приобретали промежуточные значения. Тем не менее, восстановленный режим основной массы поступавших металлоносных растворов, обеспечивавший образование сульфидов, и инверсия окислительного режима на восстановительный в отдельных струях поддерживались обилием в среде метасоматизма восстановленного углерода керогена, который в этих условиях, естественно, не окислялся.

В золоторудных полях, в которых сочетаются мощные толщи углеродистых терригенных сланцев с прорывающими их телами гранитоидов или с замещающими их телами ультраметаморфитов и мигматитов зрелых очагово-купольных построек (Кедровском, Каралонском, Уряхском, Холбинском и др.), залегающие в черных сланцах мощные золотоносные кварцевые жилы и мелкие прожилки в экзоконтактах, как обычно, не сопровождаются окислением керогена, осветлением зальбандов и существенными околожильными изменениями пород. Между тем, соседние золотоносные жилы, локализованные в гранитах, ультраметаморфитах, обрамлены зонами хорошо проработанных березитов, составляющих тыловую зону околожильных метасоматических ореолов.

В Кедровском рудном поле, например, к первым принадлежат Пинегинские, Шаманские, Осиновые, Промежуточные жилы, ко вторым – Жиганская, Баргузинские и другие. С учетом приведенных материалов это означает, что ответ на вопрос о причинах явления заключается не в принципиальных геолого-генетических отличиях процессов рудообразования в черносланцевом, с одной стороны, и несланцевом, с другой, субстрате, а в избирательном влиянии черносланцевой среды на физико-химическое состояние металлоносных растворов. Очевидно, дефицит березитов в апочерносланцевых метасоматических ореолах – следствие такого влияния. Причина может заключаться в том, что в черносланцевой среде необходимый для образования березитов кислотный режим растворов достигался лишь в отдельных струях общего потока, большей частью в ослабленном варианте. Слабокислый режим заполнявших трещины растворов обеспечивал осаждение кремнезема, но был недостаточен для образования березитов. Требуется дальнейшее исследование этого вопроса.

Таким образом, выполненная реконструкция структуры рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Сухой Лог обеспечила идентификацию его с пропилит-березитовой метасоматическими формациями. Это подчеркивает геолого-генетическую однородность месторождения с другими мезотермальными золотыми месторождениями «несланцевого» и «черносланцевого» типов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Гос. контракт № П238 от 23.04.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхозин А.В. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 1. Обзор петролого-геохимических исследований рудовмещающего субстрата // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 35–41.
2. Кучеренко И.В. К методике формирования выборок для расчета статистических параметров распределения и баланса химических элементов в околорудном пространстве гидротермальных месторождений золота // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 309. – № 2. – С. 23–30.
3. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические свидетельства геолого-генетической однородности гидротермальных месторождений золота, образованных в черносланцевом и несланцевом субстрате // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 25–35.
4. Плющев Е.В. Гидротермально-метасоматическое минералообразование как региональное геологическое явление и его металлогеническое значение // Геохимические методы при поисках скрытого оруденения. – М.: Наука, 1984. – С. 11–20.
5. Лаверов Н.П., Прокофьев В.Ю., Дистлер В.В. и др. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 371. – № 1. – С. 88–92.
6. Вилор Н.В., Казьмин Л.А. Физико-химическое моделирование метаморфогенного гидротермального золотого оруденения // Региональный метаморфизм и метаморфогенное рудообразование / под ред. Я.Н. Белевцева. – Киев: Наукова думка, 1984. – С. 179–188.
7. Шер С.Д. Околорудные изменения, сопутствующие золото-кварцевым жилам в Ленском золотоносном районе // Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании / под ред. Н.И. Наковника. – М.: Недра, 1966. – С. 282–291.
8. Коновалов И.В. Околорудная зональность одного золоторудного месторождения (Ленский район) // Геология и геофизика. – 1973. – № 1. – С. 123–125.
9. Шаров В.Н., Шмотов А.П., Коновалов И.В. Метасоматическая зональность и связь с ней оруденения. – Новосибирск: Наука, 1978. – 103 с.
10. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. и др. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
11. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
12. Русинов В.Л., Русинова О.В., Борисовский С.Е. и др. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.
13. Развозжаева Э.А., Немеров В.К., Плотникова Л.П. Органическое вещество и геохимическая специализация углеродсодержащих пород Патомского нагорья // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. – Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 1986. – С 177–179.
14. Шер С.Д., Кондратенко А.К. О метаморфических преобразованиях пород южной части Ленского золотоносного района // Труды Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института. Вып. 48. – 1962. – С. 75–101.
15. Шмотов А.П. Тектонические деформации и сопряженные с ними гидротермально-метасоматические преобразования вмещающих пород (Ленский золотоносный район) // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 218. – № 1. – С. 178–181.
16. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 8. – С. 3–16.
17. Буряк В.А., Львова Н.А. О генезисе магнезиально-железистых карбонатов Ленского золотоносного района // Эндогенное оруденение Прибайкалья / под ред. М.М. Одинцова. – М.: Наука, 1969. – С. 46–62.
18. Намолов Е.А., Чиркова В.М. Типоморфные ассоциации и региональная минеральная зональность золото-кварцевых жил Бодайбинского рудного района // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири: Тез. докл. регион. научной конф. – Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 1986. – С. 62–63.
19. Бородаевский Н.И., Шер С.Д. Об околорудных изменениях в месторождениях золота // Труды Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института. – 1967. – Вып. 76. – С. 113–126.
20. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Femophilic elements in wallrock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep // International Journal of applied and fundamental research. – 2011. – № 1. – P. 37–43.
21. Русинов В.Л., Тронева Н.В. Железо-марганцевая фация околорудных березитов // Доклады АН СССР. – 1985. – Т. 280. – № 3. – С. 730–733.
22. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. – М.: Наука, 1982. – 104 с.
23. Коренбаум С.А. Типы метасоматических пород и принципы их фациального расчленения // Доклады АН СССР. – 1985. – Т. 280. – № 1. – С. 194–197.
24. Кучеренко И. В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхозин А.В. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.
25. Кучеренко И.В. Гидродинамика трещинно-поровых породно-флюидных взаимодействий и механизм массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 37–43.
26. Кучеренко И. В. Концепция мезотермального рудообразования в золоторудных районах складчатых сооружений Южной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 182–197.

Поступила 07.09.2011 г.

УДК 551.411(575.5)

КОСМОСТРУКТУРНЫЕ ПОЗИЦИИ ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЗААНГАРСКОЙ ЧАСТИ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

Ю.С. Ананьев, А.А. Поцелуев, В.Г. Житков

Томский политехнический университет
E-mail: AnanyevYS@ignd.tpu.ru

Изучены космоструктуры заангарский части Енисейского кряжа по материалам мультиспектральных космических систем Modis и Landsat ETM+. Выделены четыре системы кольцевых структур первого порядка, интерпретируемые как глубинные очаги гранитизации. Показаны закономерности размещения золотого оруденения в космогеологических структурах. Выделенные разноранговые космогеологические структуры находят отражение в аномальных структурах геохимических полей.

Ключевые слова:
Енисейский кряж, космоматериалы, кольцевые структуры, линейные структуры, гранитизация, золоторудные объекты.

Key words:
Yenisei ridge, cosmic materials, linear structures, ring structures, granitization, gold deposits.

Введение

Енисейский кряж получил известность как золоторудная провинция в 30–40 гг. XIX в. Здесь были открыты и разрабатывались богатейшие россыпи по р. Енашимо, Удерей и др. В настоящее время основным объектом золота являются коренные золото-сульфидное, золото-кварцево-сульфидное и золото-кварцевое месторождения, такие как Олимпиадинское, Советское, Эльдорадо, Васильевское и др.

Геологическое строение и минерагения

В структурном отношении Енисейский кряж состоит из двух элементов – Ангарско-Канского выступа архея и нижнего протерозоя и заангарского байкальского складчатого сооружения (рис. 1). Граница между ними приурочена к зоне крупного субмеридионального глубинного разлома, совпадающего с долиной р. Ангары.

Складчатые сооружения Забайкальской части Енисейского кряжа состоят из узких антиклинориев и достаточно широких синклинориев. В центральной части складчатой области расположено куполовидное поднятие, где обнажаются наиболее древние нижнепротерозойские толщи тейской серии, представленные гнейсами, амфиболитами, кварцитами и мраморами. Отложения тейской серии смяты в линейные складки и прорваны гранитоидами. Верхи протерозоя сложены кварцитами, мраморами, метабазитами, сланцами и отнесены к протоплатформенному чехлу [1]. В период с раннего до низов позднего рифея на территории заангарской части сформированы сухопитская (существенно терригенная) и тунгусикская (терригенно-карбонатная) серии. Серии разделены перерывом в осадконакоплении с формированием континентальных кор выветривания и гранитоидными инъекциями. Формирование тунгусикской серии завершилось складчатостью, орогенезом и внедрением батолитовых гранитоидов. Более молодые (верхнерифейские, вендские и кембрийские) отложения залегают на подстилающих несогласно и, в настоящее время, сохранились на территории заангарской части Енисейского кряжа в грабенах и впадинах.

Традиционно, в металлогеническом районировании выделяют Вельминскую, Центрально-Енисейскую (Татарско-Ишимбинскую) и Приенисейскую металлогенические зоны [3, 4]. В отношении золотого оруденения наиболее изучена и перспективна Центрально-Енисейская зона. В ее пределах выделяют Южно-Енисейский, Ерудинский, Северо-Енисейский и Вороговский рудные районы [3].

Методика обработки материалов

В работе использованы материалы мультиспектральных космических съемок систем Modis и Landsat ETM+.

Обработка, дешифрирование, анализ космоматериалов и моделирование геологических и рудных систем выполнены в соответствии с методическими рекомендациями и подходами [5, 6]. Последовательность работ включала:

- формирование массива исходных данных;
- обработку и дешифрирования исходных растровых изображений с использованием алгоритмов классификации, процедур улучшения, комплекса методов фильтрации и передискретизации изображения;
- создание и обработку синтезированного изображения мультиспектральных снимков;
- создание производных растровых изображений с использованием «алгебры карт»;
- корреляционный анализ синтезированных изображений;

Интерпретация полученных данных проводилась с использованием материалов по геологическому строению района.

На первом этапе проводилось изучение региональных закономерностей размещения рудных районов по результатам обработки и дешифрирования космических снимков Modis. На втором этапе изучались закономерности размещения рудных узлов по результатам обработки и дешифрирования космических снимков Landsat.

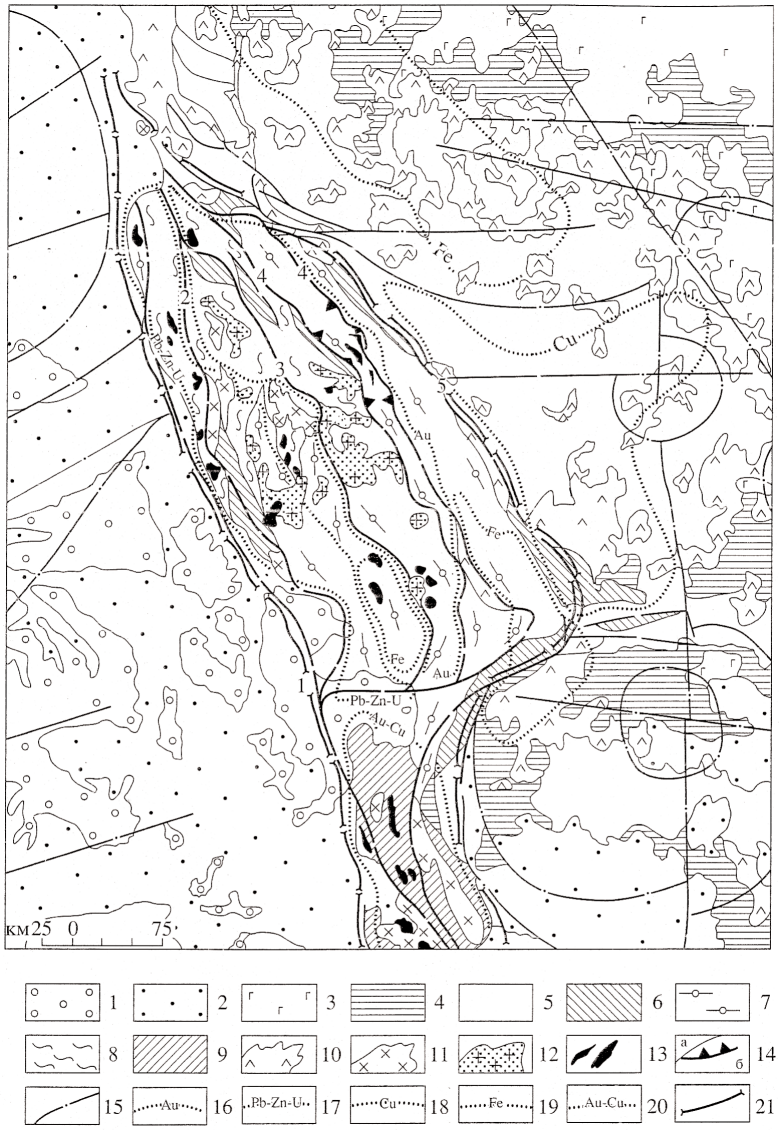


Рис. 1. *Схема геологического строения Енисейского кряжа и прилегающих фрагментов Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы [2]. 1–5 – платформенный чехол: 1) палеоген-неогеновые песчано-галечные, глинистые образования, угли, бокситы; 2) юрско-меловые континентальные песчано-галечники, глины, аргиллиты, бурые угли (юрские), бокситы (меловые); 3) пермо-триасовая диабазовая туфо-лавовая толща; 4) континентальные песчано-глинисто-сланцевые угленосные толщи карбона и перми; 5) морские известковистые глинисто-песчаные отложения девона с эффузивами преимущественно базальтоидного состава и их туфами в верхнем силуре – нижнем девоне в Приангарье и Чулымо-Енисейском прогибе; 6) вендские (средний протерозой-нижний кембрий) терригенно-гравелито-песчано-красноцветные толщи; 7) среднепротерозойские вулканогенно-терригенно-сланцевые, углистые алевросланцевые, карбонатно-метасланцевые молассоиды, кварциты, метаэффузивы чингасанской, тунгусинской и сухопитской серий; 8) нижнепротерозойские кристаллические сланцы, амфиболиты, мраморы, кварциты; 9) архейские метатерригенные катагнейсы и сланцы; 10–13 – магматические комплексы: 10) триасовые траппы: долериты, габбро-долериты; 11, 12 – гранитоиды: 11) посольненского; 12) татарско-аяхтинского комплексов; 13) габброиды и ультрабазиты; 14) глубинные разломы: установленные (а) и предполагаемые (б); 15) тектонические разрывы, дешифрированные на космо- и аэрофотоснимках; 16–22 – металлогенические области: 16) золота; 17) урана; 18) медистых песчаников; 19) железа; 20) золота и полиметаллов; 21) границы Енисейского кряжа, межблоковые зоны разломов Енисейского кряжа: 1 – Приенисейская; 2 – Вороговская; 3 – Татарская; 4 – Ишимбинская; 5 – Анкиновская*

Методика космогеологических исследований [5, 6] подразумевает проведение дешифрирования в различных масштабах – от региональных к детальным. Такой подход позволяет установить крупные системы на первом этапе и выявить их взаимоотношения и в дальнейшем определить особенности их строения и развития.

Результаты и их обсуждение

Космогеологическая модель Енисейского кряжа, полученная в результате дешифрирования космических снимков систем Modis и Landsat ETM+, приведена на рис. 2. Исследования показали, что в пределах заангарской части Енисейского кряжа отчетливо проявлены структуры линейной и кольцевой (дуговой) морфологии.

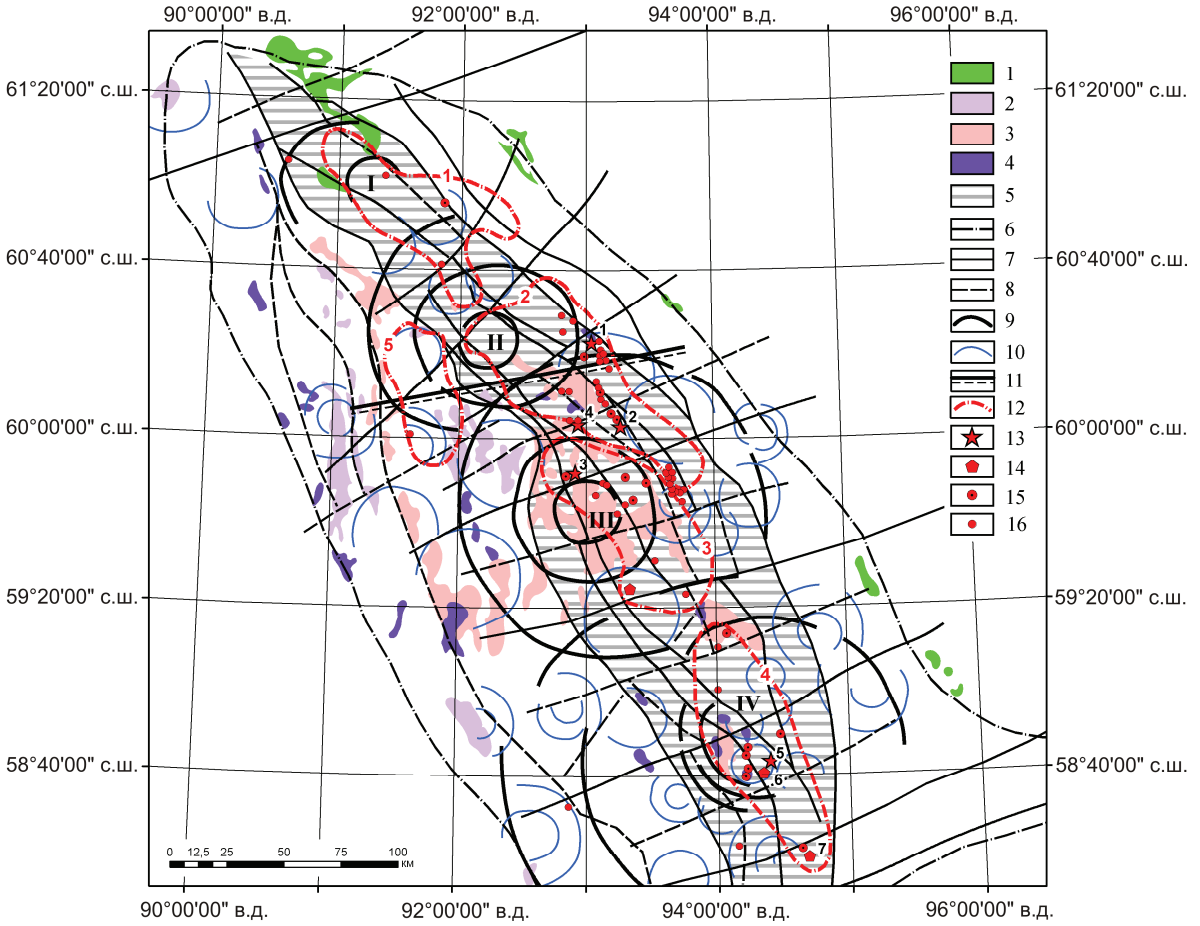


Рис. 2. *Схема космогеологических структур заангарской части Енисейского кряжа. 1–4 – магматические образования: 1) триасовые траппы; 2) гранитоиды посольненского комплекса; 3) гранитоиды татарско-аяхтинского комплекса; 4) габброиды и ультрабазиты; 5) Татарско-Ишимбинская тектоническая зона; 6) границы Енисейского кряжа; 7 – 8 – разрывные нарушения: 7) первого порядка; 8) второго порядка; 9 – 10 – системы кольцевых структур: 9) первого порядка (I – Вороговская, II – Северо-Енисейская, III – Ерудинская, IV – Партизанская); 10) второго порядка; 11) положение фрагмента геотраверса «Батолит»; 12) рудные районы: 1 – Вороговский; 2 – Северо-Енисейский; 3 – Ерудинский; 4 – Южно-Енисейский; 5 – Гаревско-Чапский; 13 – 15 – месторождения золота: 13) крупные; 14) средние; 15) мелкие: 1 – Советское; 2 – Эльдорадо; 3 – Олимпиадинское; 4 – Благодатное; 5 – Удерейское; 6 – Васильевское; 7 – Попутнинское; 8 – Ведугинское; 16 – рудопроявления*

Региональные линейные структуры Енисейского кряжа проявлены следующими признаками: прямолинейными участками элементов рельефа и фрагментами границ между блоками с различной текстурой рельефа, линейными границами разновидностей растительного покрова, ландшафтными неоднородностями линейной морфологии, прямолинейными участками границ между геологическими телами и др.

Среди линейных преобладают структуры северо-западного и северо-восточного простирания, которые соответствуют глубинным разломам различного уровня заложения (рис. 2). Структуры северо-западного простирания определяют положение металлогенических зон Енисейского кряжа, рассекают кровлю базитового слоя и уходят своими корнями в мантию [7]. Структуры северо-восточного простирания не столь глубинны – они читаются только в рельефе гранулитового слоя. По ним вероятны вертикальные перемещения блоков верхней части земной коры. Именно вертикальным перемещениям по этим структурам обязано куполовидное поднятие центральной части кряжа.

Признаками выделения кольцевых структур явились: кольцевые и дуговые границы между блоками с различными спектральными характеристиками и текстурой рельефа; кольцевые и дуговые границы между дешифрируемыми геологическими телами; границы ландшафтных неоднородностей, дуговой и кольцевой морфологии.

По закономерному телескопированному положению выделены системы кольцевых структур первого и второго порядков (рис. 2).

Системы кольцевых структур первого порядка

К системам структур первого порядка отнесены четыре системы – Вороговская, Северо-Енисейская, Ерудинская и Партизанская. Они образованы телескопированными кольцевыми и дуговыми

фрагментами диаметрами от 23 до 185 км. Следует отметить, что центральные части структур первого порядка располагаются в пределах Татарско-Ишимбинской тектонической зоны и, вероятно, являются ее производными.

Предполагаемые глубины формирования структур первого порядка оценены с использованием подходов [8] с учетом глубинного строения [7]. Установлены следующие показатели (таблица).

Таблица. *Предельные глубины формирования систем структур первого порядка*

Структуры	Глубины, км	Сейсмические слои
Вороговская	19	Гранулитовый
Северо-Енисейская	33	Базитовый
Ерудинская	45	Раздел базитового слоя и верхней мантии
Партизанская	62	Верхняя мантия

Таким образом, устанавливается направленное увеличение глубин формирования систем кольцевых структур с северо-запада на юго-восток, при этом Вороговская и Северо-Енисейская структуры имеют коровое заложение, а Ерудинская и Партизанская – верхнемантийное.

Для геологической интерпретации систем структур первого порядка привлечены геолого-геофизические данные по геотраверсу «Батолит» [2] (рис. 3) и карты сейсмических слоев [7].

Сопоставление выделенных систем кольцевых структур первого порядка с геофизическими данными [2] указывает на то, что эти системы отражают глубинные грибообразные очаги гранитизации, корневые части которых «погружаются» в мантию. Кроме того, кольцевые структуры отражают строение кровли очага гранитизации, а эксцентричное положение дуговых сегментов указывают на поло-

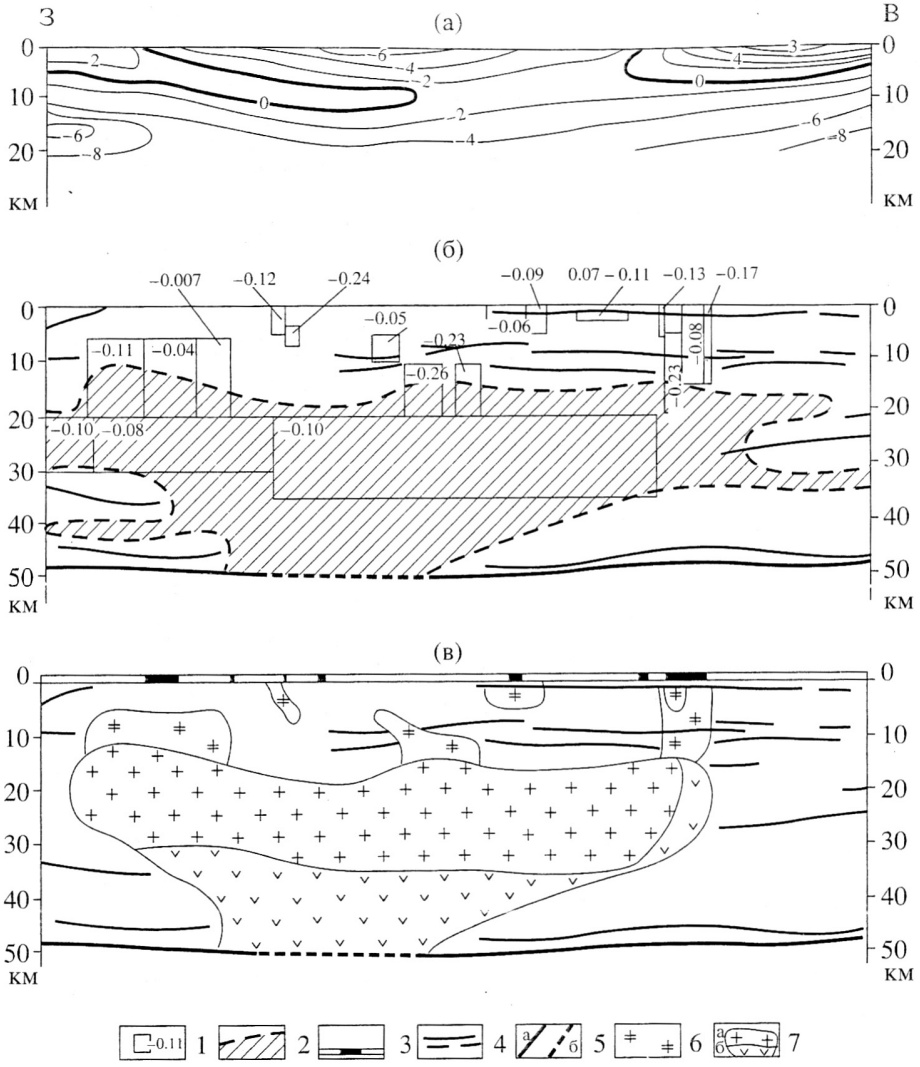


Рис. 3. *Интерпретация геолого-геофизических данных по профилю «Батолит» [2]: а – разрез изолиний трансформант силы тяжести по методу «Гравискан» (мГл), б – сейсмоплотностной разрез, в – интерпретационный разрез. 1) плотностные неоднородности и величина дефекта плотности в г/см³; 2) зона сейсмической прозрачности; 3) выходы гранитоидов на уровень современного эрозионного среза (PR_1^3); 4) сейсмические границы; 5) граница Мохоровичича: прослеживаемая по сейсмическим данным (а) и предполагаемая (б); 6) промежуточные магматические очаги преимущественно кислого состава; 7) первичный магматический очаг преимущественно кислого состава (а) и преимущественно основного и среднего состава (б)*

жение канала поступления глубинного вещества в земную кору.

Вороговская система кольцевых структур первого порядка располагается в северном окончании Енисейского кряжа. Она образована сочетанием двух телескопированных дуговых структур диаметрами 23 и 56 км. В пределах системы располагаются рудопроявления урана (Захребетинское, Полярное, Кутукасское) и золота (Ольгинское, Высокое и др.). Положение рудопроявлений контролируется участками сопряжения продольных северо-западных с северо-восточными разрывными нарушениями.

Северо-Енисейская система образована закономерным сочетанием трех эксцентрично расположенных кольцевых и дуговых структур диаметрами 26...98 км. Для этой системы характерна некоторая эксцентричность положения дуговых сегментов и их центроидов, которые смещены в западном направлении. В пределах системы располагаются месторождения урана Осиновое, Оленье и Кедровое [11] и большое количество рудопроявлений золота (Бурное, Чингасанское, Уволжско-Тейское, Нойбинское и др.). Положение рудных объектов в пределах системы контролируется узлами сопряжения продольных северо-западных с северо-восточными разрывными структурами.

Ерудинская система образована закономерным сочетанием трех эксцентрично расположенных кольцевых и дуговых структур диаметрами 28...135 км. Эксцентричность этой системы, так же как и для Северо-Енисейской, проявлена в западном направлении. В пределах Ерудинской системы располагаются месторождения и рудопроявления золота (Олимпиадинское, Эльдорадо, Советское, Ведугинское и др.) и рудопроявления урана (Вексельное, Ногатинское, Дальнее, Лендахское и др.). Положение рудных объектов контролируется узлами сопряжения продольных северо-западных и северо-восточных разрывных нарушений.

Партизанская система кольцевых структур первого порядка образована закономерным сочетанием пяти кольцевых и дуговых сегментов, диаметрами 46...185 км. Для структуры характерна слабо выраженная эксцентричность в северо-восточном направлении. В пределах системы располагаются месторождения и рудопроявления золота (Удерейское, Васильевское, Попутнинское, Герфедское и др.) и единичные урановые рудопроявления (Красавица, Гольцовое, Рудиковское). Структурные условия рудоконтроля определяются узлами сопряжения продольных северо-западных и северо-восточных разрывных нарушений.

Таким образом, связь известных промышленно значимых золоторудных месторождений с системами кольцевых структур первого порядка, интерпретируемых как глубинные очаги гранитизации, еще раз подчеркивает их мантийную природу.

Выявленные структуры согласуются с результатами исследований региональных геохимических полей по потокам рассеяния (рис. 4).

Характерной чертой распределения мышьяка следует считать его пространственную приуроченность к Ерудинской и Северо-Енисейской системам кольцевых структур первого порядка. За пределами этих структур аномальные концентрации мышьяка локальны. При этом локальные аномальные потоки рассеяния вероятно усилены техногенным воздействием [9]. В распределении вольфрама так же обнаруживаются определенные закономерности. Подавляющее большинство проб с аномальными концентрациями тяготеют к Северо-Енисейской и Ерудинской системам кольцевых структур первого порядка и сопряженным структурам второго порядка.

Распределение золота по мнению многих авторов не отражает реальную картину вследствие интенсивной техногенной нарушенности территории с одной стороны и обилия многочисленных рудопроявлений золото-кварцевой формации с другой. Тем не менее, в распределении золота С.А. Григоров установил закономерности «вихревой» морфологии в связи с развитием рудно-магматических систем [10]. В распределении Ni и Zn устанавливаются определенные закономерности – аномальные структуры распределения этих элементов фиксируют внешнюю южную часть Енашиминской системы кольцевых структур первого порядка и ядерную часть Северо-Енисейской структуры. Такое различное структурное положение геохимических полей этих элементов можно объяснить различными уровнями эрозионного среза – Ерудинский ореол гранитизации эродирован в большей степени нежели Северо-Енисейский, что не противоречит геологическим данным.

Выделенные системы кольцевых структур первого порядка (очаги гранитизации) контролируют положение золото- и урановорудных районов Енисейского кряжа. По мнению И.И. Абрамовича [12], чем более глубинные корни имеет рудообразующая система, тем больший рудный потенциал она несет. Высокий рудоносный потенциал имеют очаги гранитизации верхнемантийного заложения. С учетом последнего предполагается, что основной золоторудный потенциал Енисейского кряжа связан с Ерудинской и Партизанской системами, в меньшей степени с Северо-Енисейской. Потенциальная золотоносность Вороговской системы весьма низкая. Полученные предположения согласуются с прогнозными оценками [3].

Золоторудная минерализация закономерно размещается относительно систем структур первого порядка. Так, в пределах Ерудинской системы золотосульфидные объекты тяготеют к центральным частям (Олимпиадинское, Ведугинское месторождения), жильно-прожилковые к средним (Благодатное, Кварцевая Гора, Эльдорадо и др.), а золото-кварцевые – к фронтальным (Советское, Полярная Звезда, Пролетарское). При этом возраст рудных образований [1], несущих арсенопиритовую с золотом минерализацию, так же закономерно увеличивается от центральных частей к краевым.

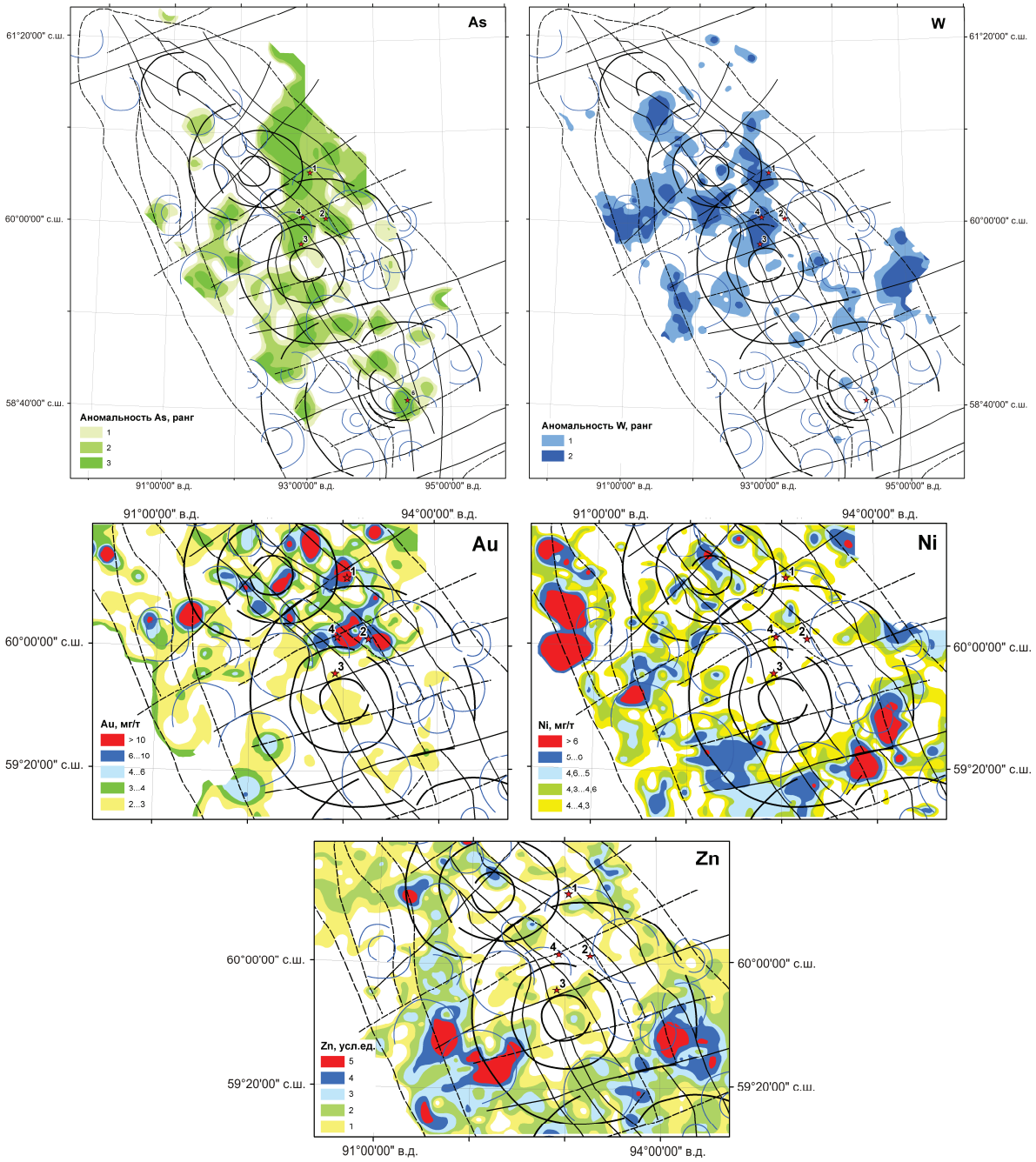


Рис. 4. *Аномальные структуры геохимических полей Енисейского кряжа (распределение W и As по [9], Au, Ni и Zn по [10]). Остальные условные обозначения на рис. 2*

Кольцевые структуры второго порядка

Кольцевые структуры второго порядка распространены во всех тектонических структурах Енисейского кряжа. При этом они тяготеют к ареалам распространения интрузивных пород, как вскрытых эрозией, так и слепых (рис. 5). Такие интрузии В.И. Казанский и Е.П. Максимов [13] относят к промежуточным телам, имеющими связь с крупными батолитами. Диаметры структур составляют 10...45 км. В отдельных случаях фиксируются телескопированные системы. Устанавливается достаточно отчетливая приуроченность известных рудных узлов к таким структурам (рис. 6).

По спектральным аномалиям космических снимков кольцевой и дуговой морфологии выделены структуры более высокого порядка. По нашему мнению эти структуры отражают влияние небольших магматических тел и следы гидротермальных процессов. В качестве примера, рассмотрим структуры третьего порядка, вмещающие Бурненский золоторудный узел.

Бурненский золоторудный узел располагается в северной части Северо-Енисейского рудного района в клиновидной области растяжения в юго-западном крыле межрегионального Ангаро-Бахтин-

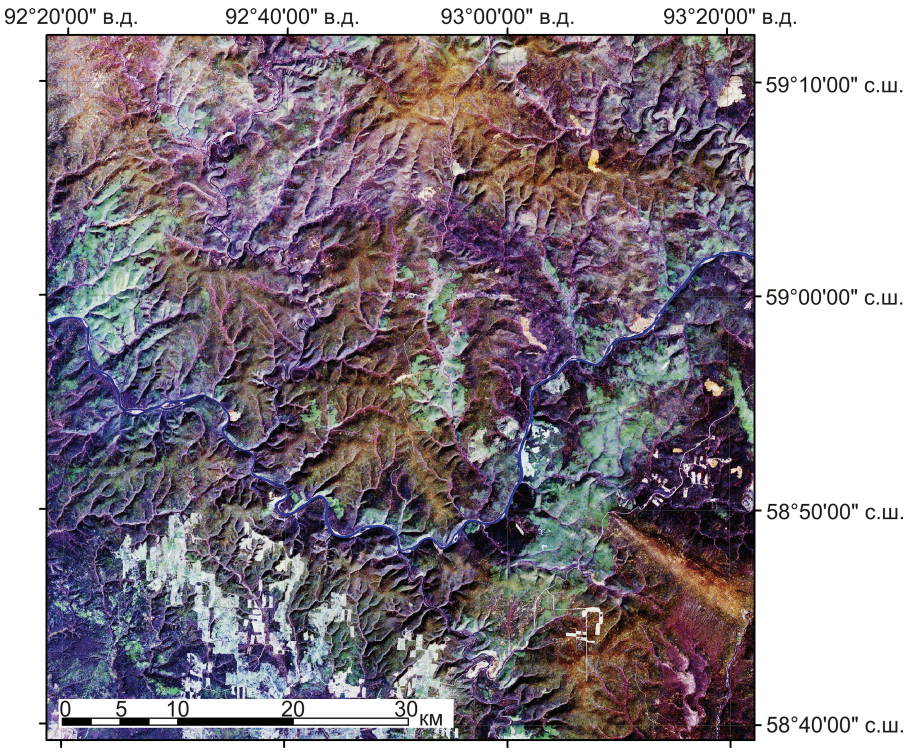


Рис. 5. *Кольцевая структура второго порядка, представляющая ореол ороговикования слепого интрузивного тела*

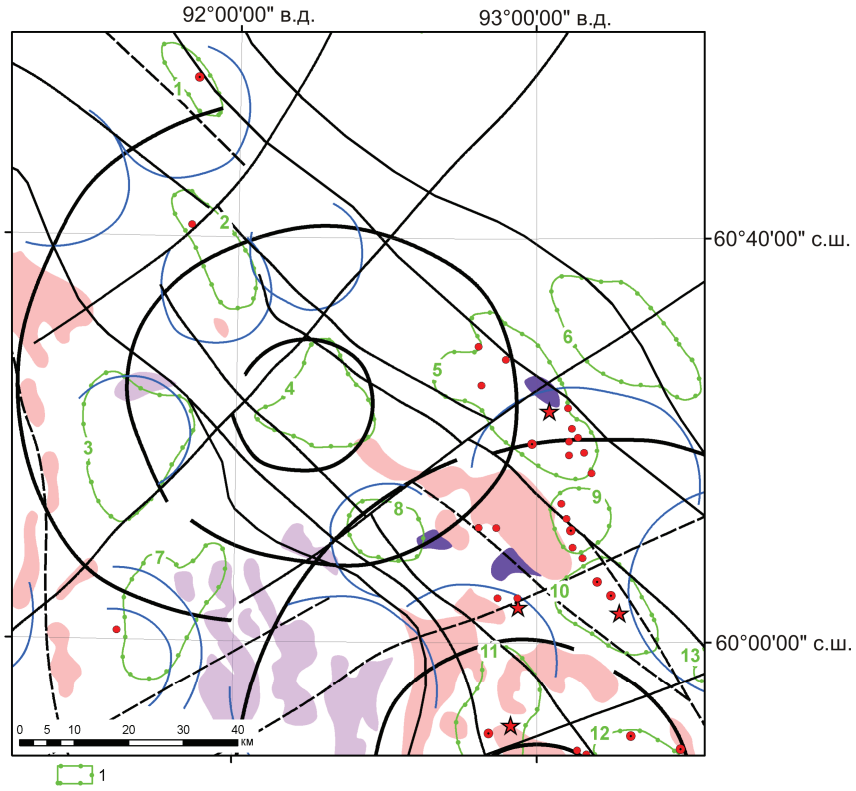


Рис. 6. *Положение золоторудных узлов Северо-Енисейского рудного района. 1 – рудные узлы: 1) Бурненский; 2) Чингасанский; 3) Гаревский; 4) Нойбинский; 5) Советский; 6) Иочимский; 7) Верхне-Тисский; 8) Уволжско-Тейский; 9) Александро-во-Агеевский; 10) Перевальнинский; 11) Верхне-Енашиминский; 12) Ерудинский; 13) Вангашский. Остальные условные обозначения на рис. 2*

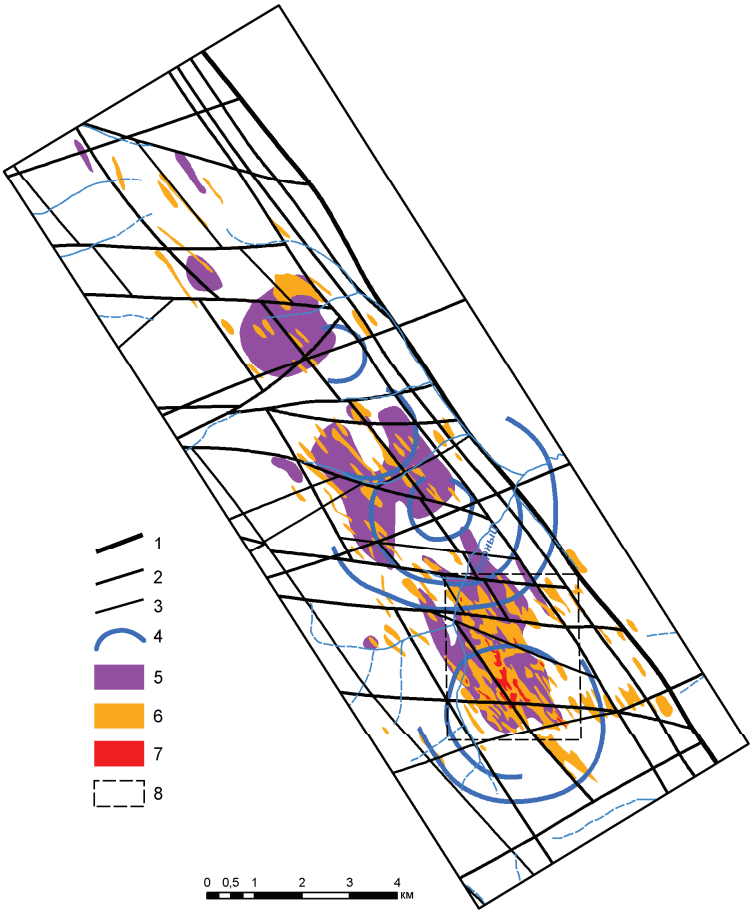


Рис. 7. *Космоструктурная схема Бурненского рудного узла с элементами рудоносности. 1–3 – линеаменты: 1) первого порядка; 2) второго порядка; 3) прочие; 4) кольцевые структуры; 5) метасоматиты сидерит-хлорит-гидрослюдистого состава (НПО «Геосфера», 2007); 6–7 – литохимические аномалии золота, г/т: 6) более 0,02, 7) более 0,1 (НПО «Геосфера», 2007); 8) контур детальных литохимических работ НПО «Геосфера»*

ского разлома. Он приурочен к участку сочленения структур растяжения второго и третьего порядков, представленных невскрытыми интрузивными малоплотными телами. Золоторудная минерализация представлена золото-кварцевыми жильно-прожилковыми зонами с околорудными сидерит-хлорит-гидрослюдистыми и пирит-хлорит-серицит-кварцевыми метасоматитами. Оруденение размещается в сланцах сухопитской серии [14].

Космоструктурная позиция Бурненского узла (рис. 7) определяется закономерным сочетанием линейных и кольцевых структур. Среди разнонаправленных линейных, выделены структуры трех порядков. К структурам первого порядка отнесен линеамент северо-западного простирания. Он однозначно интерпретируется как Чапинский разлом. В юго-западном борту Чапинского разлома хорошо дешифрируется серия продольных вероятно крутопадающих разрывных структур второго порядка. Поперечные структуры северо-восточного простирания второго порядка образуют ступенчато-блоковое строение рудного узла. Внутри блоков выделяются разнонаправленные структуры более высоких порядков, которые осложняют их геологическое строение. Кольцевые структуры выделены в юго-восточной, центральной и северо-западной частях изучаемой площади, положение которых определяется узлами сопряжения северо-западных и северо-восточных линеаментов. Диаметры кольцевых структур варьируют в пределах от 2,5 до 5 км. Пространственная связь выделенных кольцевых структур с телами метасоматитов, позволяет интерпретировать их как участки распада гидротермально-флюидных систем.

Геохимические особенности юго-восточной кольцевой системы можно проследить по литохимическим данным НПО «Геосфера» (рис. 8).

Анализ рис. 7 позволяет заключить следующее. Максимально продуктивные вторичные геохимические ореолы золота тяготеют к центральной части кольцевой структуры и контролируются участком сопряжения продольного северо-западного и субширотного разломов. Близкие закономерности устанавливаются в распределении W и Ag. Ореолы Li и Pb образуют внешнюю зону по отношению к ореолам Au, W и Ag. Mo и V отгоняются во фронтальные зоны метасоматоза, где образуют дуговые (особенно V) ореолы, повторяющие контуры кольцевой структуры.

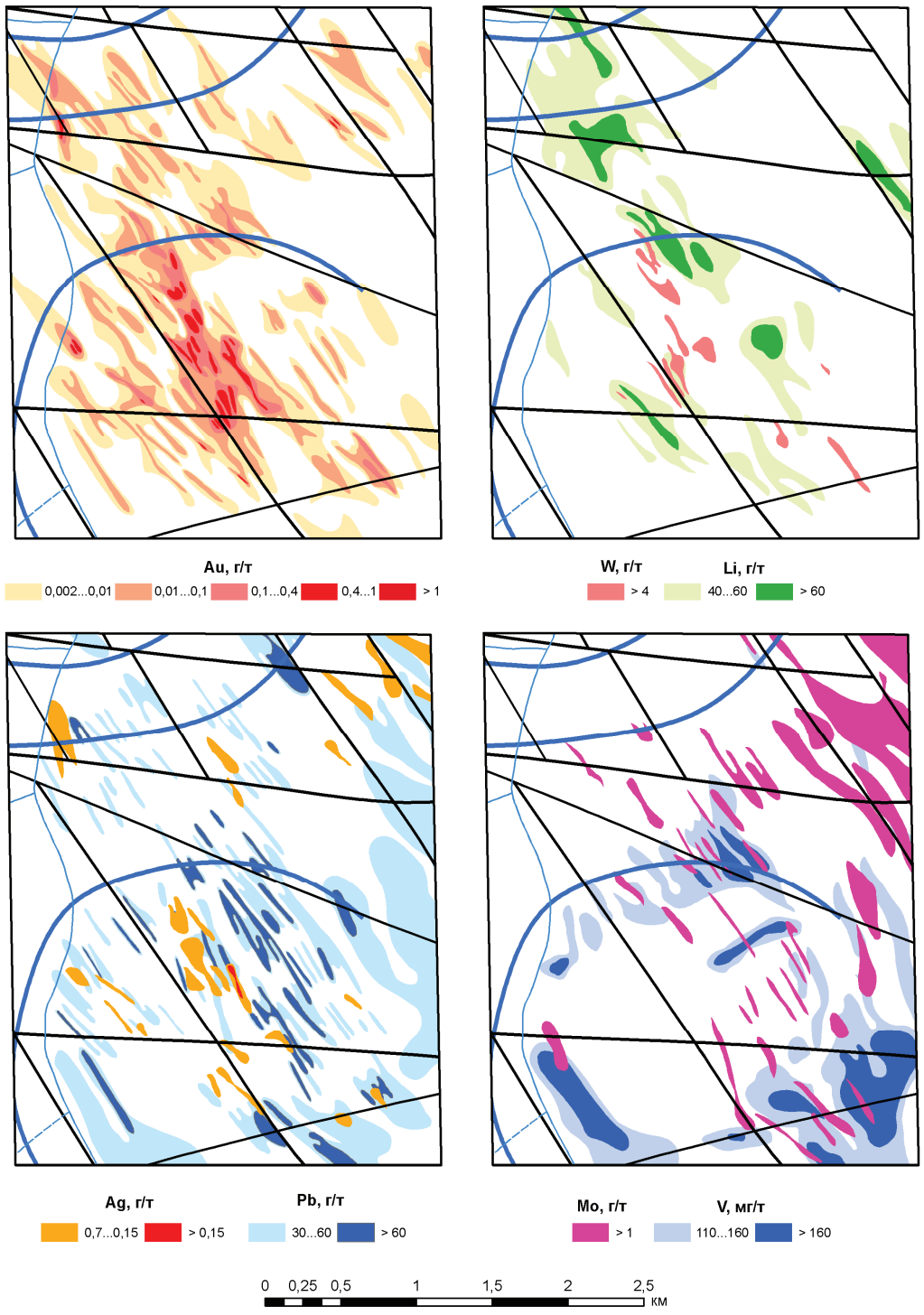


Рис. 8. *Литохимические ореолы рассеяния Au, W, Li, Ag, Pb, Mo, V (по материалам НПО «Геосфера», 2007 г.). Условные обозначения на рис. 7*

Выводы

В пределах заангарской части Енисейского кряжа выделены четыре системы кольцевых структур первого порядка, интерпретируемые как разноглубинные очаги гранитизации. Кольцевые структуры второго порядка связаны с промежуточными интрузивными телами, как слепыми, так и вскрытыми эрозией. Структуры более высокого порядка отражают следы взаимодействия гидротермально-флюидных систем с вмещающими породами. Выделенные разноранговые кольцевые структуры подчеркиваются телами метасоматитов и геохимическими данными.

Положение рудных районов определяется глубинными очагами гранитизации и надочаговыми продольными разрывными нарушениями первого

порядка. Рудные узлы тяготеют к надкупольным частям невскрытых промежуточных интрузивных тел. Промышленно значимые золоторудные объекты располагаются в пределах систем кольцевых структур первого порядка подкорового заложения. Золотосульфидные объекты тяготеют к центральным надкупольным частям очагов гранитизации, а кварцево-жильные – к фронтальным.

Совокупность выявленных закономерностей позволяет рассматривать их в качестве разноранговых прогнозно-поисковых критериев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-00115), а также Министерства образования и науки. АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)». Регистрационный номер: 2.1.1/12705.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов А.М., Ананьев А.А., Полева Т.В., Хохлов А.Н., Власов В.А., Звягина Е.А., Федорова А.В., Тишин П.А., Леонтьев С.И. Золоторудная металлогения Енисейского кряжа: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2010. – V. 4. –№ 3. – P. 371–395.
2. Константинов М.М., Данковцев Р.Ф., Симкин Г.С., Черкасов С.В. Глубинное строение и закономерности размещения месторождений Северо-Енисейского золоторудного района (Россия) // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41. – № 5. – С. 425–436.
3. Сердюк С.С. Металлогеническое и прогнозное районирование золотоносности Красноярского Края // Цветные металлы-2010: Труды II Междунар. конгресса. – Красноярск, 2010. – Разд. 1. – С. 6–16.
4. Тектоника и металлогения Нижнего Приангарья / под ред. А.И. Забияки. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – 322 с.
5. Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 316 с.
6. Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Назаров В.Н., Кузнецов А.С. Дистанционные методы геологических исследований, прогноза и поиска полезных ископаемых (на примере Рудного Алтая). – Томск: STT, 2007. – 228 с.
7. Сальников А.С. Сейсмогеологическое строение земной коры платформенных и складчатых областей Сибири по данным региональных сейсмических исследований преломленными волнами: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2008. – 33 с.
8. Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ – М.: Наука, 1985. – 200 с.
9. Зверев В.В. Некоторые особенности регионального геохимического поля заангарской части Енисейского кряжа // Разведка и охрана недр. – 2004. – № 6. – С. 40–45.
10. Григоров С.А. Отражение в геохимическом поле рудообразующей системы в качестве объекта геохимических поисков // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 5. – С. 8–13.
11. Ножкин А.Д., Миронов А.Г., Комарницкий Г.М. Типы урановой и золото-урановой минерализации в терригенных и вулканогенно-терригенных образованиях докембрия Енисейского кряжа // Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах: Матер. Всеросс. конф. с иностранным участием. – Улан-Уде: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. – Ч. 1. – С. 21–24.
12. Абрамович И.И. Геодинамика и мантийные корни рудных формаций. – М.: МПР РФ, ВСЕГЕИ, ГЕОКАРТ, МАНПО, 1998. – 140 с.
13. Казанский В.И., Максимов Е.П. Геологическая позиция и история формирования Эльконского ураново-рудного района // Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42. – № 3. – С. 212–230.
14. Черняева Е.И., Черняев Е.В., Кошкарев В.Л. Новый золоторудный узел «Бурный» Енисейского кряжа // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 268–287.

Поступила 02.09.2011 г.

УДК 550.84:553.411.071

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КВАРЦЕВАЯ ГОРА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

С.С. Ильин, В.А. Макаров

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
E-mail: IlyinStanislav@yandex.ru

Рассмотрена зональность первичных геохимических ореолов месторождения Кварцевая Гора (Енисейский кряж). На основе данных спектрального анализа керновых проб изучено объемное распределение элементов-спутников золотого оруденения, охарактеризованы вертикальная и поперечная зональности рудно-минерализованной зоны. Охарактеризована изменчивость корреляционных отношений микроэлементов по вертикали в пределах зоны минерализации. Выделены и описаны геохимические ассоциации, в том числе две золотоносных; обоснована связь крупного высокопробного гравитационного золота с наложенной полиметаллической ассоциацией. Сделан вывод о средне-нижнерудном эрозионном срезе объекта.

Ключевые слова:
Золото, Енисейский кряж, месторождение, геохимическая зональность, модель, первичные ореолы, эрозионный срез, геохимические ассоциации.

Key words:
Gold, Enisei ridge, deposit, geochemical zonality, model, primary haloes, erosion level, geochemical associations.

Месторождение Кварцевая Гора расположено в пределах Каменско-Чернореченской структурно-формационной зоны Енисейского кряжа, ограниченной с запада зоной Татарского, а с востока – зоной Ишимбинского глубинных разломов. В металлогеническом плане месторождение относится к Ерудинскому рудному узлу.

По типу оруденения месторождение принадлежит к золотокварцевой малосульфидной формации с содержанием сульфидов до 1,5 %. Морфологический тип оруденения – жильно-прожилковая зона сложного внутреннего строения. Руды месторождения представлены минерализованными двуслюдяными и биотитовыми сланцами, роговиками, метасоматитами кварцевого состава. Главными рудными минералами являются пирротин, пирит, халькопирит, арсенопирит, золото и его соединения. Ближайшим аналогом по вещественному составу руд и геолого-промышленному типу является месторождение «Благодатное».

В строении месторождения принимают участие стратифицированные образования нижнего рифея, представленные отложениями кординской свиты. По результатам разведочных работ они разделены на четыре пачки (снизу вверх): известковистую кварцитовую, переходную, метаалевролитовую и алевросланцевую. Алевросланцевая пачка, в свою очередь, разделена на три горизонта, из которых два верхних являются рудолокализующими (рис. 1). Молодые отложения представлены мел-палеогеновыми корами выветривания и образованиями палеогеновой и четвертичной систем.

Из интрузивных образований на площади месторождения развиты гранитоиды Татарско-Аяхтинского комплекса (R_3ta), представленные породами Нижне-Чиримбинского массива. Тектонический контакт интрузии, представленной гранитами первой фазы внедрения, проходит вдоль восточной границы объекта, рис. 1.

Ключевую роль в структуре месторождения играет Главный надвиг (I), служивший одновременно рудоподводящим каналом и экраном для рудоносных растворов [1]. Главный надвиг разделяет Восточный и Центральный структурные блоки. Строение рудного поля осложнено Подстилающим сдвиго-надвигом (II), отделяющим Южный и Центральный структурные блоки. Минерализованная зона расположена в автохтоне Главного надвига и по структурным условиям делится на три участка: Северный, Центральный, Южный. Морфоструктура рудно-минерализованной зоны (РМЗ) на Северном и Южном участках имеет уплощенно-коническую форму, относительно простые и выдержанные параметры залегания. В пределах Северного участка выделяется рудное тело 1 (РТ-1) выдержанной морфологии и залегания, значительной мощности. При переходе к Центральному участку, приуроченному к ядерной части синклинали руч. Мал. Кварцевого, выдержанное РТ-1 делится на сложно построенный пакет маломощных тел складчатого залегания, формируя структуру «конского хвоста».

Месторождение разведано в 2005–2009 гг. траншеями и колонковыми скважинами по сети 80×40 м со сгущением в центральной части до 40×40 м. В процессе разведки пробы на спектральный анализ отбирались исключительно из керновых проб (7559 проб). Скважины, охваченные спектральным анализом, образуют сеть 160×80 м. Пробы на пробирный анализ на золото отбирались по всем выработкам (всего более 28000 проб).

Содержания золота определялись пробирным анализом в ПАЛ ЗАО «Полюс» (аттестована ОАО «ИРГИРЕДМЕТ» 19.11.2004 г., свидетельство № 43/2004). Геохимические пробы анализировались спектральным анализом на 20 элементов (Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb,

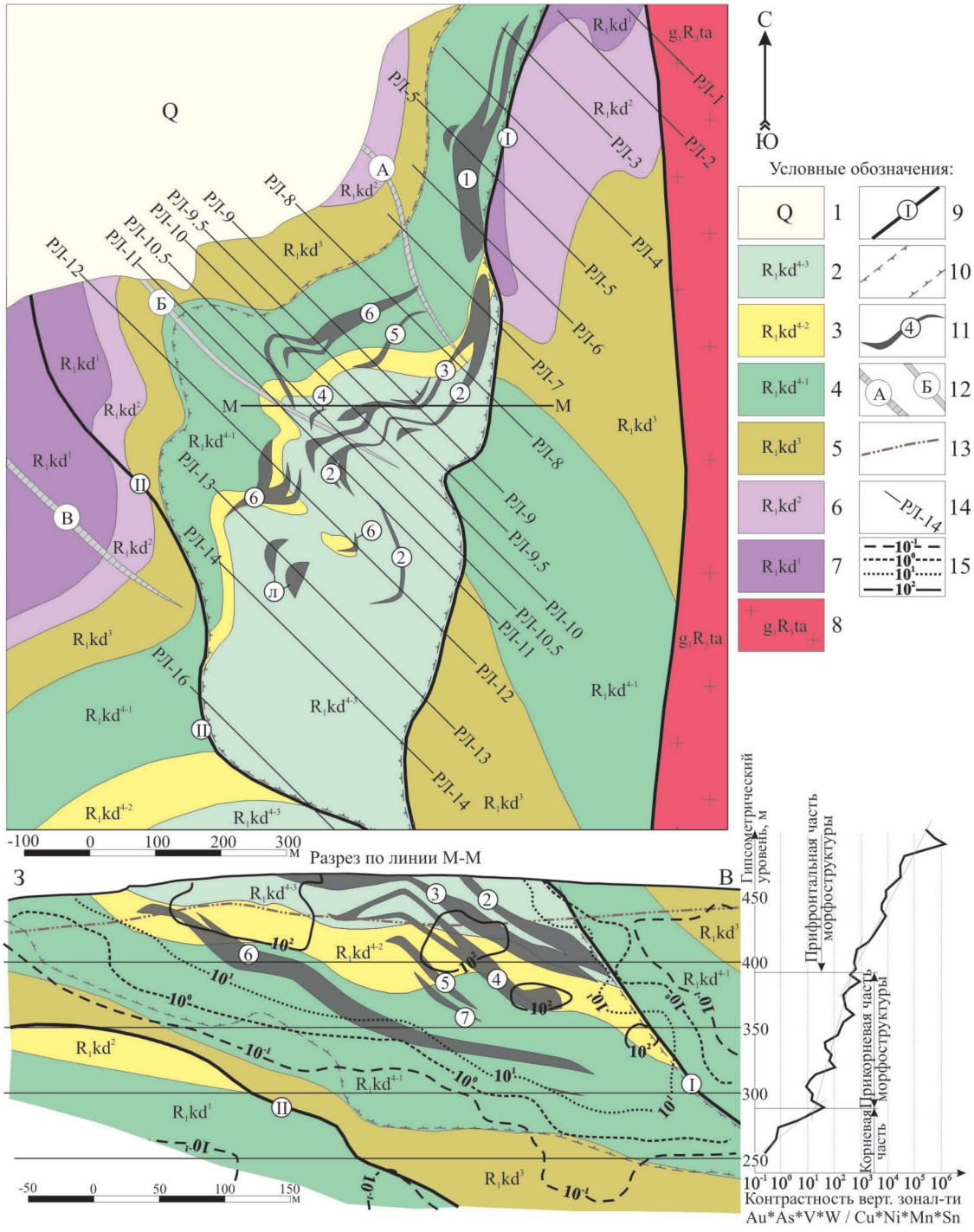


Рис. 1. *Геологический план месторождения Кварцевая Гора: 1) четвертичные отложения; 2–5) верхнекординская подсвита (?): 2) верхний горизонт, чередование сланцев, метаалевролитов, метапесчаников; 3) средний горизонт метапесчаников, рудоконтролирующая и рудолокализующая структура; 4) нижний горизонт, чередование сланцев, редкие прослои метаалевролитов; 5) метаалевролитовая пачка; 6, 7) среднекординская подсвита (?): 6) переходная пачка, чередование кварцитов, сланцев, метаалевролитов; 7) пачка известковистых кварцитов; 8) гранитоиды Татарско-Аяхтинского комплекса; 9) разрывные нарушения: I – Главный разлом; II – подстилающий разлом; 10) контур рудно-минерализованной зоны; 11) рудные тела, их номера (л – одиночные линзы); 12) оси антиклиналей и синклиналей: А – антиклиналь горы Подкварцевой, Б – синклиналь руч. Мал. Кварцевый, В – антиклиналь горы Кварцевой; 13) граница зоны выветривания; 14) разведочные линии; 15) изоконцентраты показателя вертикальной зональности Au·As·V·W/(Cu·Mn·Ni·Sn)*

Sn, Ti, V, W, Zn) в Лаборатории анализа минерального сырья исследовательского центра ЗАО «Полюс», г. Красноярск (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22 ЧЦ26). Все геохимические пробы дополнительно подвергались спектрозолотометрическому анализу в лаборатории Минусинской геологоразведочной экспедиции (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21 АЮ29).

Элементы Be, Bi, Mo, Sb содержатся на месторождении в количествах, близких к порогу обнаружения. Количество проб ниже порога обнаружения и их доля от общего количества проб составляет 1919 (25 %), 4397 (58 %), 3759 (50 %), 5025 (66 %) соответственно. По этой причине выводы о зональности этих элементов могут быть неоднозначными.

С целью изучения зональности первичных ореолов в горно-геологической системе MicroMine с использованием стандартных процедур было смоделировано распределение микроэлементов в объёме рудного поля. Процесс моделирования распределений элементов включал следующие стадии: оконтуривание геологических образований и структурных элементов на разрезах и планах горизонтов, построение объёмных твердотельных моделей и поверхностей (РМЗ, основные структуры рудного поля), представление объёма рудного поля в виде блочной модели, интерполяция в модель содержаний элементов спутников методом обратных расстояний. Блочная модель кодировалась солидами и поверхностями по геолого-структурным признакам. Указанная модель использовалась для всестороннего изучения геохимической зональности рудного поля.

В таблице приведены средние содержания микроэлементов во вмещающих породах месторождения в сравнении с их кларковыми значениями [5]. Содержания Au, Ag, Be, Co, Cr, Cu, Mo, Nb, Ni, Pb, Sn, V, W, Zn во вмещающих породах рудного поля близки к кларковым значениям (отношение к кларку колеблется от 0,5 до 2,0). Содержания As, B, Bi, Mn, Sb во вмещающих породах по сравнению с кларковыми выше в 2 раза и более (до 10...13 кларков). Содержание бария, напротив, ниже в 4 раза.

По характеру связи с золотоносностью руд все элементы-спутники разделены на 6 групп (рис. 2).

Элементы первой (I) группы (Au, Pb, Be, As, Ti) характеризуются ростом среднего содержания с увеличением золотоносности руд. Для золота и мышьяка величина накопления на рубеже «РМЗ – вмещающие породы» максимальна по сравнению со всеми остальными элементами и составляет 2,2 и 30 раз соответственно. Группа разделена на две подгруппы: а) с линейным возрастанием среднего содержания (Au, Pb, Be); б) с двузонным линейным возрастанием среднего содержания (As, Ti): в бедных и рядовых рудах отмечается быстрый рост до рубежа Au≥1,0 г/т, который сменяется медленным линейным ростом в более богатых рудах.

Во вторую группу (II) входят элементы с ограниченным ростом среднего содержания при увеличении содержаний золота в руде (Co, Mo, W). Среднее содержание элементов данной группы быстро растет в бедных и рядовых рудах, останавливаясь для руд с Au≥0,6...1,0 г/т.

К третьей группе (III) отнесены элементы с синусоидальным характером изменения среднего содержания (Ag, B, Mn, Zn). Они характеризуются ростом содержания в бедных рудах (до рубежа Au=0,4...0,6 г/т), снижением его в рядовых рудах и возобновлением роста в богатых рудах (при Au≥1,8...2,0 г/т).

Элементы с одиночным экстремумом-максимумом в распределении среднего содержания (Ba, Nb, Sb, V) отнесены к группе IV. Среднее содержание этих элементов практически линейно растет в бедных и рядовых рудах (Au≤0,8...1,0 г/т), а после достижения максимума начинает снижаться. Снижение может быть двузонным с небольшими сближенными экстремумами максимум-минимум в районе Au≥2,0 г/т.

Элементы, характеризующиеся практически линейным снижением среднего содержания при переходе к все более продуктивным золотоносным зонам, отнесены к пятой (V) группе (Bi, Cr, Cu, Ni).

Содержания олова, отнесенного к группе VI, очень быстро снижаются при переходе от бедных руд к рядовым, но в рядовых и богатых золотоносных рудах (с порога Au≥1,0 г/т) олово начинает монотонно накапливаться.

Разделение элементов на такие группы закономерно и отражает гидротермально-метасоматическую природу месторождения. Высокие содержания кобальта и мышьяка коррелируют с пирит-арсенопирит-пирротиновой минерализацией, вместе с которой проявлено золотое оруденение. Обратная связь содержаний хрома и золота отражает развитие окварцевания, с которым связана золотоносная минерализация. Минералогическими исследованиями установлено, что золото образует интерметаллиды Au-Ag-Bi-Te. Обратная связь со-

Таблица. *Средние содержания микроэлементов во вмещающих породах рудного поля, n·10⁻³ % (Au, Ag – г/т)*

Au	Ag	As	B	Ba	Be	Bi	Co	Cr	Cu	Выборка
0,0026	0,068	1,24	6,4	16,1	0,201	0,163	0,93	7,3	2,9	Вмещающие породы мест. Кварцевая. Гора
0,0015	0,053	0,48	1,7	62,4	0,210	0,016	1,73	9,2	2,80	Верх. континент. кора [5]
Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Sb	Sn	V	W	Zn	Выборка
44	0,072	1,00	3,1	1,5	0,548	0,35	5,9	0,17	8,1	Вмещающие породы мест. Кварцевая. Гора
7	0,110	1,20	4,7	1,7	0,040	0,21	9,7	0,19	6,7	Верх. континент. кора [5]

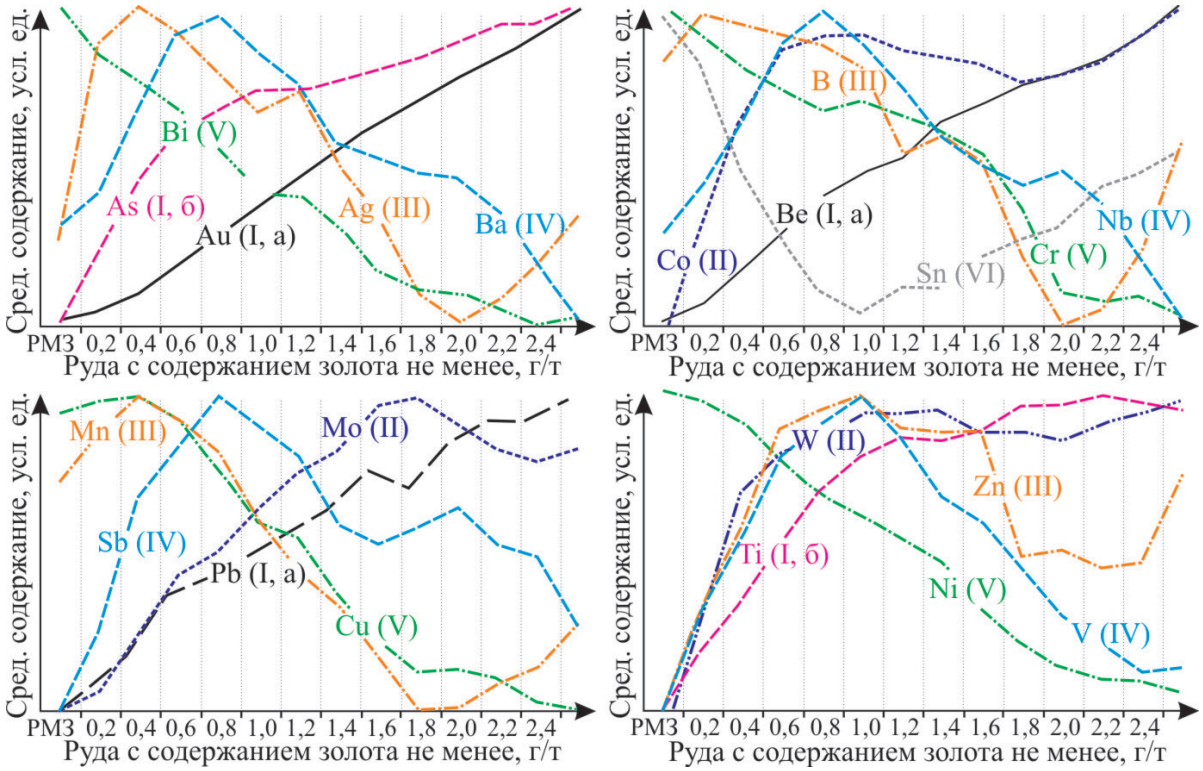


Рис. 2. *Связь средних содержаний элементов-спутников в рудах с золотоносностью*

держаний висмута отражает тот факт, что крупное и высокопробное золото обычно является интерстиционным и связано с галенитом, а не с интерметаллидами.

По сходству изменения продуктивности ореолов в вертикальном направлении элементы-спутники разделены на 7 групп (рис. 3).

К группе 1 отнесен только ванадий (V), продуктивность ореолов которого полициклично увеличивается с повышением гипсометрического уровня.

В группу 2 входят элементы (Au, As, Co, W), продуктивность которых линейно растёт кверху разреза, но несколько снижается на верхних горизонтах. Наиболее интенсивное и раннее (с горизонта +400...+425 м) снижение продуктивности характерно для ореолов кобальта. Продуктивность ореолов остальных членов группы снижается начиная с отметок +475 м.

Для ореолов микроэлементов группы 3 (Pb, Ba, Mo) характерно субсимметричное изменение продуктивности относительно некоторого гипсометрического уровня. Продуктивность ореолов элементов данной группы возрастает от нижних горизонтов к верхним довольно быстро, но также стремительно снижается после достижения экстремума. Барий и молибден имеют наиболее симметричную форму распределения продуктивности с максимумом на горизонтах +350...+375 м, в отличие от свинца, центр симметрии которого находится выше по разрезу, в районе горизонта +425 м.

Продуктивность ореолов элементов группы 4 (Cr, Zn) слабо растёт от нижних горизонтов к верхним, но быстро снижается после достижения максимума. Экстремум графика изменения продуктивности хрома располагается на горизонте +325...+350 м, в то время как максимум продуктивности ореолов цинка располагается на 75 м выше.

В группу 5 отнесены элементы с синусоидальным характером кривой изменения продуктивности (Bi, Ag, B). Для них характерно некоторое снижение продуктивности по восстанию рудоносных растворов с последующим ростом до определенного гипсометрического уровня. На самых верхних уровнях продуктивность ореолов элементов группы снова снижается. Наиболее близки по характеру изменения продуктивности серебро и бор, при этом серебро также можно отнести и к группе 2, с которой его связывает золотоносная ассоциация.

Ореолы элементов группы 6 (Sb, Ti) характеризуются практически линейным и интенсивным снижением продуктивности при переходе к верхним уровням разреза. Снижение продуктивности ореолов сменяется ее ростом в верхних частях разреза и приурочена к интервалам глубин +425...+425 м, причем для сурьмы эта смена в характере изменения продуктивности наступает раньше. Максимумы продуктивности микроэлементов, относящихся к данной группе, тяготеют к нижним горизонтам.

К группе 7 отнесены элементы, продуктивность ореолов которых снижается вверх по разрезу (Nb, Cu, Ni, Sn, Mn, Be). Их можно разделить на 2 подгруппы: с почти линейным интенсивным снижением по всей вертикали разреза (Nb, Cu, Ni, Sn) и с двузонным снижением продуктивности: слабым на нижних и средних горизонтах и резким в верхней части разреза (Mn, Be).

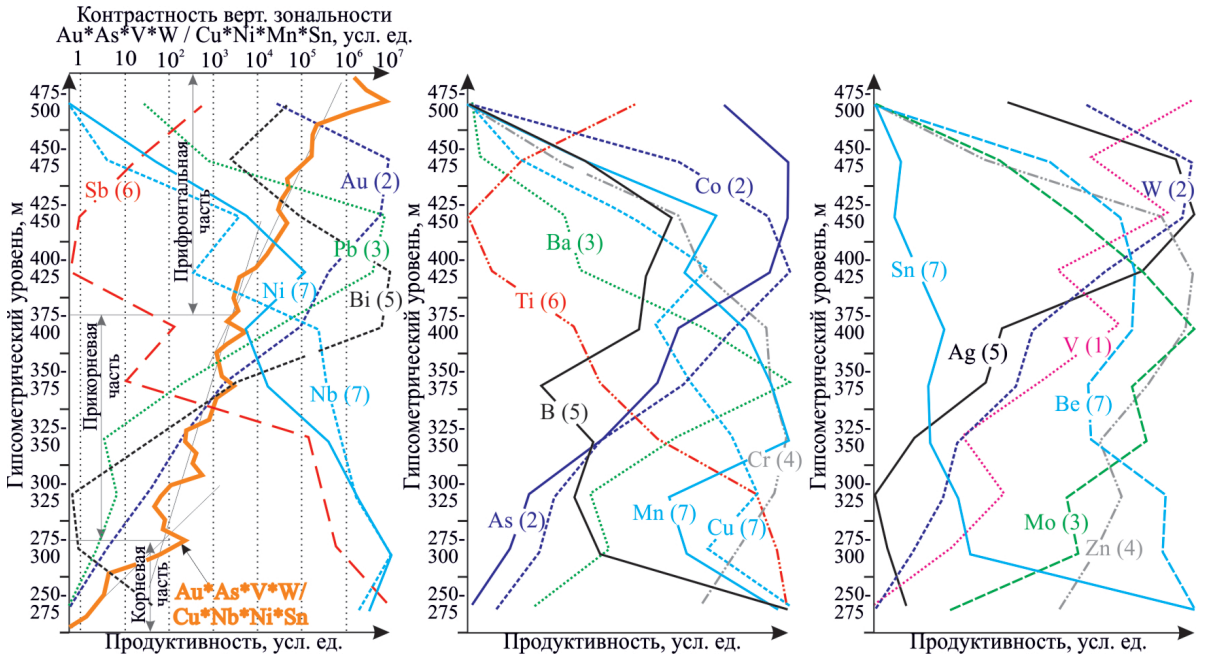


Рис. 3. *Вертикальная зональность первичных ореолов золота и элементов-спутников*

На основе расчёта погоризонтных продуктивностей и их градиентов для месторождения Кварцевая Гора ряд вертикальной зональности отложения имеет вид (снизу вверх): Sn-Be-Sb-Ti-Ni-Nb-Mn-Cr-Ba-Mo-Bi-Co-Zn-Ag-Pb-B-As-Au-W-V. В общих чертах этот ряд имеет сходство с описанной вертикальной зональностью средне- и высокотемпературных золоторудных месторождений [2]. Значительно отклоняются от классического ряда вольфрам и ванадий, что, очевидно, обусловлено разнообразием минеральных форм, которыми представлены данные элементы. Так, согласно С.В. Григоряну [2], вольфрам шеелита обычно тяготеет к нижним частям гидротермальной колонны, в то время как вольфрамит располагается в более верхних ее частях. Увеличение продуктивности ореолов ванадия по восстанию, возможно, связано с его изоморфными примесями в составе нерудных минералов метасоматитов и вмещающих пород.

Ряд вертикальной зональности в целом и характер распределения отдельных элементов позволяют предложить для оценки уровня эрозионного среза следующий коэффициент: K_3=Au·As·V·W/(Nb·Ni·Cu·Sn). Значения данного коэффициента практически линейно возрастают в 10^6...10^7 раз с горизонта +250 м до горизонта +500 м (рис. 3). На графике изменения K_3 можно выделить 3 зоны с различным углом наклона, отвечающих различным частям морфоструктуры: до +290 м (корневая часть), +290...+390 м (прикорневая часть), от +390 м (прифронтальная часть). Наиболее интенсивный рост значений K_3 происходит в корневой части морфоструктуры, градиент составляет 2 порядка на 25 м. В прикорневой части рост K_3 замедляется до 0,35...0,50 порядка на 25 м, отражая начало разгрузки рудоносных растворов. С горизонта +390 м рост значений K_3 несколько увеличивается до величины 0,6 порядка на 25 м.

Переходы между частями морфоструктуры РМЗ отчётливо распознаются не только по характеру изменения коэффициента вертикальной зональности, но и по закономерностям эволюции корреляционных связей элементов в РМЗ по направлению движения гидротерм (рис. 4).

Нижние горизонты РМЗ (корневая часть морфоструктуры) характеризуются высокой теснотой и разнообразием корреляционных зависимостей. Количество сильных положительных связей в корневой части РМЗ максимально, но быстро падает с приближением к прикорневой зоне. Средняя величина силы положительных связей снижается даже быстрее, чем количество сильных связей. Данный факт объясняется тем, что на нижнем уровне зарождения РМЗ растворы поступают в сжатую среду по 2–3 подводящим каналам и все элементы отлагаются пространственно сближено, что обуславливает их высокую корреляцию.

Вход в прикорневую часть сопровождается небольшим увеличением числа и силы корреляционных зависимостей. С горизонта +325 м наблюдается дальнейшее снижение разнообразия и тесноты связей. Горизонт +375 м является пограничным между прикорневой и прифронтальной частями РМЗ. Вход в прифронтальную часть РМЗ распознается по резкому снижению количества и силы корреляционных зависимостей. Данная тенденция прослеживается вплоть до горизонта +450, который также является пограничным – к нему приурочены резкие изменения в среднем содержании многих элементов. Выше горизонта +450 м фиксируется как рост числа положительных корреляционных зависимостей, так и усиление их тесно-

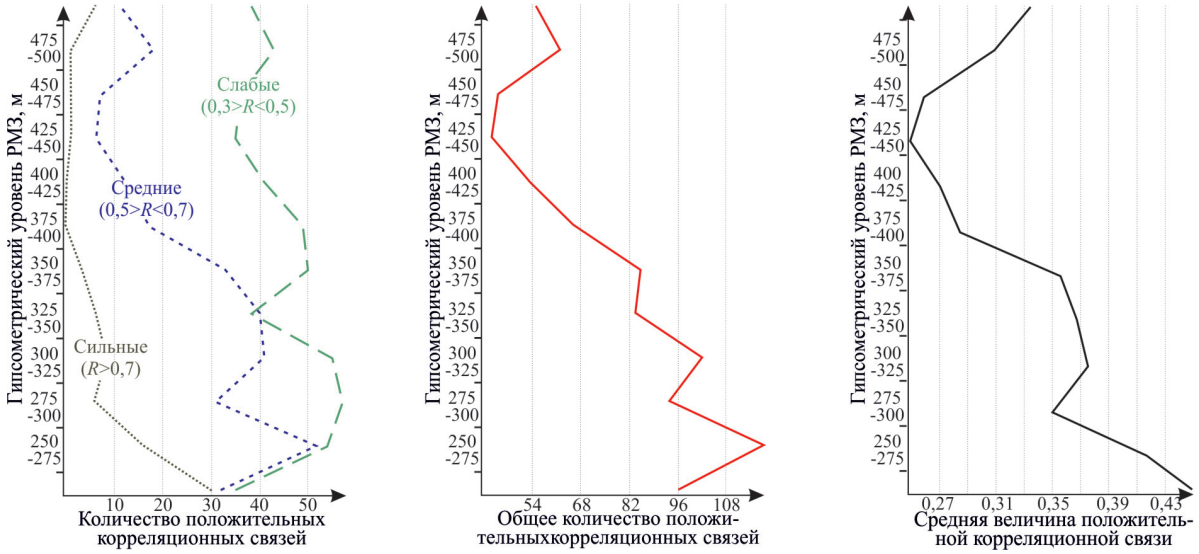


Рис. 4. *Эволюция корреляционных связей элементов по восстанию гидротермальной колонны месторождения*

ты, что может свидетельствовать о достижении гидротермами некоего равновесия.

Рудно-минерализованная зона характеризуется выраженной симметричной поперечной зональностью, что наиболее явно проявляется на Центральном участке. Большинство элементов в этой части РМЗ характеризуются максимумом содержаний, приуроченным к ее осевой части, и достаточно резким снижением среднего содержания в направлении периферии. Для элементов главной рудоносной ассоциации (As, Au, в меньшей степени W) величина этого снижения максимальна и достигает 1,4...3,4 раз. Северный участок по сумме рангов по всем элементам имеет симметричный характер поперечной зональности, но для отдельно взятых элементов (в том числе и для всей рудоносной ассоциации) устанавливается нарастание среднего содержания на восток (в сторону Главного надвига).

На основе факторного анализа и корреляционных дендрограмм в пределах рудного поля выделены 6 главных геохимических ассоциаций.

Ассоциация Nb-Sb-Ti-Ba является устойчивой и проявляется во всех исследованных доменах (вмещающие породы, РМЗ и руды различного уровня золотоносности) в качестве первого или второго по значимости фактора. Часто данная ассоциация расширяется такими элементами как Mn, V, Cu, Ni, реже Co, W, Pb, Zn. В общем виде данная ассоциация выделена также в рудах и породах месторождения Благодатного, располагающегося в 60 км на север от месторождения Кварцевая Гора. Корреляционная связь внутри ядра ассоциации обычно не менее 0,45. Области повышенных значений фактора, отвечающего данной ассоциации, приходятся на Центральный участок РМЗ. По всей видимости, данная ассоциация связана с воздействием гранитоидных массивов и метасоматической проработкой пород рудного поля. При наложении на нее рудного процесса концентрация элементов, входящих в данную ассоциацию, многократно возрастает, что наглядно видно на более продуктивном Центральном участке. Повышенные значения элементов данной ассоциации также приурочены к пачке R_1kd^2 во вмещающих породах Южного блока.

Комплексная ассоциация (Pb-Zn-Ag)+(Sn-B-Cu-W) наиболее ярко проявляется в РМЗ; ее роль отчетливо возрастает по мере нарастания продуктивности золотоносной минерализации. Во вмещающих породах данная ассоциация обычно более размыта и проявляется в качестве второстепенного фактора. Предположительно данная ассоциация связана с высокотемпературными растворами, отделявшимися от кислых интрузий Татарско-Аяхтинского комплекса. Обе составляющие данной комплексной ассоциации могут проявляться раздельно друг от друга. Примечательно, что в рудном поле месторождения Благодатного также присутствует крайне устойчивая и высокая связь между медью и вольфрамом.

Ассоциация, маркирующая развитие гидротермального и метасоматического процессов, объединяет в себе такие элементы как Co, Ni, Zn, Cu, Mn, Cr, к которым могут добавляться V, Pb, B, Ba, Ti, Nb. Ранг данной ассоциации в РМЗ невелик (5–6 факторы), но он возрастает во вмещающих породах (3–4-й факторы).

С золоторудной минерализацией на месторождении связаны две геохимических ассоциации. Наиболее развитой и устойчивой является ассоциация Au-As-Ag-Co-W, проявленная во всех исследованных доменах (вмещающих породах всех трех структурных блоков, РМЗ, рудах различной степени золотоносности). Установлено явное выпадение из данной ассоциации золота в наиболее золотоносных участках. В вертикальном срезе РМЗ данная ассоциация наиболее отчетливо проявляется в интервалах глубин +300...+400 м (прикорневая

часть морфоструктуры). При переходе в прифронтальную часть морфоструктуры связи внутри ассоциации ослабевают. Помимо ослабления связей наблюдается крайне резкое уменьшение влияния серебра в общей дисперсии данного фактора. Выше горизонта +475 м прослеживается связь Au-As-W+Ag, кобальт практически выпадает из данной ассоциации.

Золото-полиметаллическая ассоциация (Pb-Zn-Au-As) проявляется в качестве второстепенного рудно-геохимического фактора. Внутри ассоциации золото сильнее коррелирует со свинцом; серебро связывается с данной ассоциацией только в бедных рудах и очень слабо.

Показательно, что минералогическими и технологическими исследованиями руд на месторождении установлено наличие двух генераций золота: 1) интерстиционное и свободное – крупное, высокой пробности (содержание серебра до 20 %), хорошо раскрываемое и извлекаемое гравитационным способом, золото часто заполняет трещины в арсенопирите вместе с галенитом; 2) интерметаллиды и срастания (включения) золота в сульфидах – мелкое, средней пробности (содержание серебра до 50 %), плохо раскрываемое, извлекаемое преимущественно флотацией. Количественное соотношение генераций золота минералогическим способом не изучено.

В результате проведенных исследований установлен ряд вертикальной зональности на месторождении Кварцевая Гора, на основании которого предложен коэффициент зональности, изменяющийся на 6 и более порядков от корневой части морфоструктуры к низам ее прифронтальной части. Характер изменения коэффициента вертикальной зональности позволяет разделить корневую, прикорневую и прифронтальную части морфоструктуры РМЗ. Исследование парных корреляционных зависимостей микроэлементов по восстанию РМЗ подтверждает разделение морфоструктуры на указанные выше зоны. Совокупность морфоструктурных и геохимических параметров рудно-минерализованной зоны позволяет утверждать о средне-нижнерудном эрозионном срезе рудного поля.

Исследованиями определены и описаны главные геохимические ассоциации рудного поля, в том числе и две рудоносные ассоциации: Au-As-Ag-Co-W и Au-As-Pb-Zn, связанные с первой и второй генерацией золота соответственно. Высокопробное и крупное интерстиционное золото связано с наложенной полиметаллическо-мышьяковистой ассоциацией и, по всей видимости, имеет подчинённое значение. Связь богатых золотоносных руд со второй рудоносной геохимической ассоциацией подтверждается прямой зависимостью между содержаниями золота и свинца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошилов В.Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 104 с.
2. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 408 с.
3. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 191 с.
4. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. – М.: Недра, 1990. – 248 с.
5. Rudnik R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. – Elsevier: Pergamon, 2003. – V. 3. – 659 p.

Поступила 02.11.2011 г.

УДК 553.3.071

ЭНДОГЕННАЯ РУДНО-МЕТАСОМАТИЧЕСАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ МАЙСКО-ЛЕБЕДСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ

Т.В. Тимкин

Томский политехнический университет
E-mail: timkintv@mail.ru

Изучена первичная рудно-метасоматическая зональность Майско-Лебедского рудного поля (Горная Шория). Показано нахождение и распределение рудного вещества на уровне: рудного тела, месторождения и рудного поля в целом. Установлено, что золоторудные участки имеют небольшой эрозионный срез и перспективу их на глубину.

***Ключевые слова**:*
Оруденение, уровни организации вещества, золото, рудно-метасоматическая зональность.

***Key words**:*
Mineralization, levels of the organization of substance, gold, rudno-metasomatic zonality.

Введение

Теория эндогенной зональности сегодня является важным разделом учения о рудных месторождениях. Она описывает и объясняет закономерности локализации руд различного состава во времени и пространстве любого объема (уровня) – от крупных регионов до рудных тел. Накопленный эмпирический материал, данные экспериментов и моделирования, теоретические разработки в области физико-химической динамики рудообразующих гидротермальных систем однозначно свидетельствуют о том, что зональность есть наиболее общее свойство месторождений полезных ископаемых. На уровне современного состояния теория зональности является единственно реальной основой детального прогнозирования, в особенности скрытого оруденения. Все это определяет высокий интерес к проблеме и актуальность ее исследования на примере месторождений различных металлов [1].

Автором выполнены исследования по выявлению зональности: минералогической, метасоматической и геохимической на примере Майско-Лебедского золоторудного поля (Горная Шория). Целями исследования являлось реконструкция рудно-метасоматической зональности и прогноз золотого оруденения.

Майско-Лебедское рудное поле находиться на северо-востоке Горного Алтая в пределах Северо-Алтайского золотоносного пояса. В региональном плане рудное поле расположено в области сочленения субмеридиональных структур Кузнецкого Алатау и субширотных Западного Саяна в пределах Алтайско-Кузнецко-Западно-Саянского вулканоплутонического пояса, что обусловило длительную историю его формирования с неоднократными импульсами тектоно-магматической активности и гидротермальной деятельности [2].

Территория характеризуется высокой россыпной золотоносностью, широким развитием высокопродуктивных ореолов рассеяния золота и элементов спутников Ag, Bi, As, Pb, Cu, Zn. В пределах рудного поля известно Майское золото-магнетитовое (скарновое) месторождение, которое частично отработано, а также большое количество перспективных рудопроявлений золота.

В качестве исходного материала использовались данные, полученные в результате проведения работ по изучению рудно-метасоматических образований на территории Майско-Лебедского золоторудного поля в период с 2004 по 2008 гг., выполненные работниками кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Томского политехнического университета в сотрудничестве с ООО «Тэтис-Т» г. Новокузнецк [3].

Под рудно-метасоматической зональностью понимается закономерное пространственное размещение минеральных парагенезисов руд и метасоматитов, обусловленных эволюцией единого потока флюидов.

Для различных уровней организации вещества зональность характеризуется специфическими морфологическими и генетическими особенностями, поэтому целесообразно рассмотреть ее отдельно в масштабе рудного тела, рудоносных участков (месторождений) и рудного поля в целом.

Зональность ранга рудных тел

Эталонными объектами для изучения зональности на этом уровне организации вещества нами приняты рудные тела вскрытых выработками и скважинами рудных зон Майского месторождения и Семеновского рудопроявления (рис. 1).

Рудные тела описываемых объектов занимают вполне определенное положение в зональных рудно-метасоматических конструкциях. В выделяемом Майско-Лебедском рудном поле присутствуют два разновозрастных геолого-промышленных типа оруденения: контактово-метасоматические залежи золото-магнетит-сульфидных руд в апоскарновых пропилитах, отнесенных нами к каледонскому этапу рудообразования, и минерализованные зоны золото-сульфидно-кварцевых прожилково-вкрапленных руд герцинского этапа (табл.), приуроченных к метасоматитам березитового типа, вложенных в линейные зоны пропилитов [3].

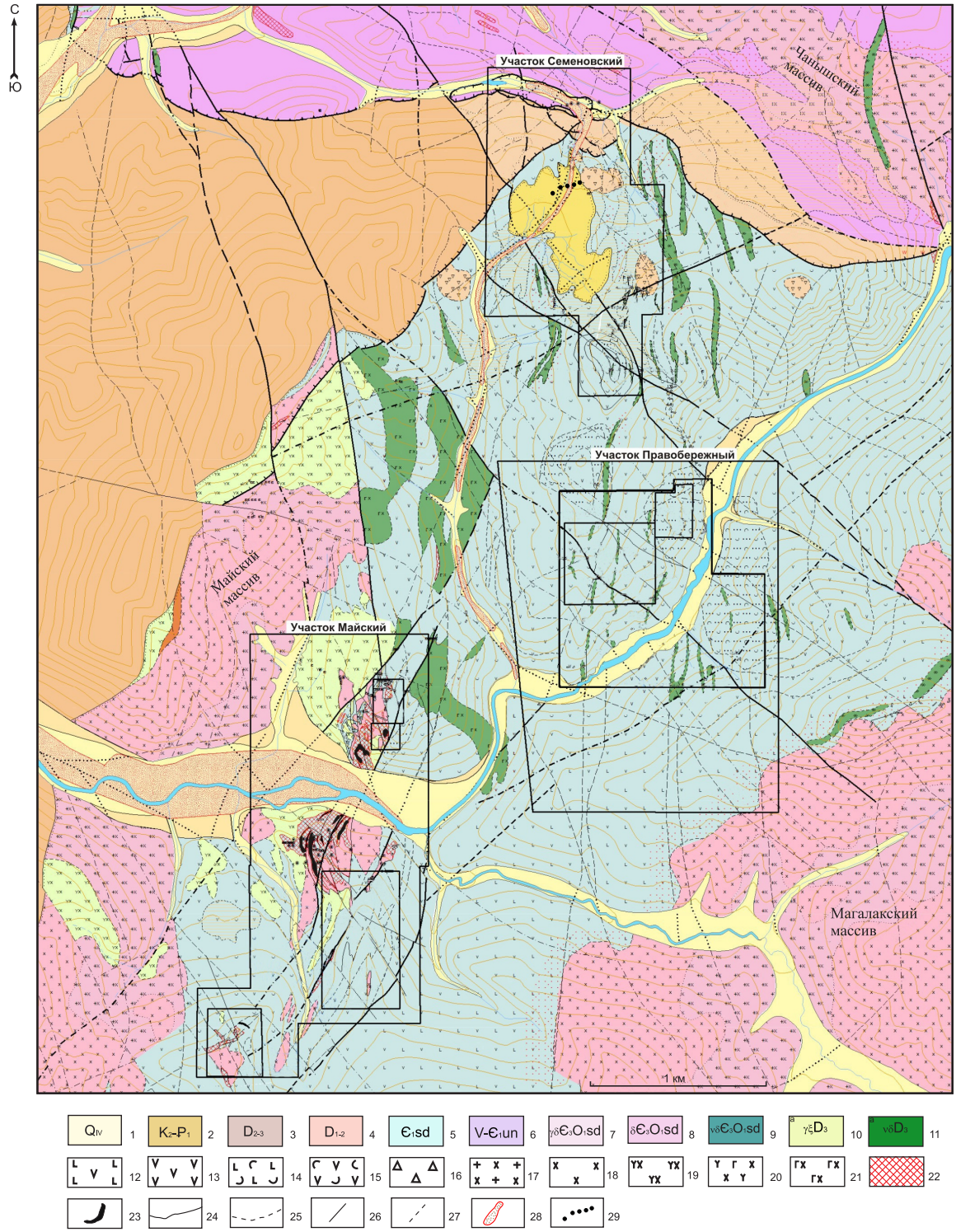


Рис. 1. *Геологическая карта Майско-Лебедского золоторудного поля (по материалам ООО «Тэтис-Т»): 1) аллювиальные отложения пойм: галечники, пески, супеси; 2) пестроцветные продукты кор выветривания: глины и суглинки каолинит-гидрослюдистые с обломками выветрелых пород; 3) андезиты, андезитодациты, их туфы и эксплозивные лавобрекчии, реже лавы риодацитов и прослои карбонатных пород; 4) красноцветные песчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты; 5) андезибазальты, андезиты и их туфы, туфобрекчии, туфопесчаники, туфоаргиллиты, известняки; 6) базальты и их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты; 7) плагиограниты, кварцевые диориты; 8) диориты, гранодиориты; 9) габбро, габбродиориты; 10) монцодиориты, граносиениты; 11) габбро, габбродиориты, диориты; 12) андезибазальты; 13) андезиты; 14) туфы базальтового состава; 15) туфы андезитов крупнообломочные; 16) эксплозивные и экструзивные брекчии; 17) гранодиориты, плагиограниты; 18) диориты кварцевые; 19) сиенодиориты; 20) монцодиориты; 21) габбродиориты; 22) скарны гранат-пироксеновые, скарнирование; 23) рудно-магнетитовые тела; 24–25) геологические границы прослеживаемые и предполагаемые; 26–27) разрывные нарушения прослеживаемые и предполагаемые; 28) россыпи; 29) скважины № 78–8-9–10–21*

Таблица. *Последовательность минералообразования и вещественный состав руд Майско-Лебедского рудного поля*

Металлогеническая эпоха	Палеозойская Pz ($Є_2$–O_1)		Палеозойская Pz (D_3)		
Этап минерализации	каледонский		герцинский		
Стадия минерализации	скарновая	послескарновая (пропилитовая)	березитовая		
	допродуктивная	*ранняя продуктивная*	*поздняя продуктивная*		*поздняя постпродуктивная*
Минеральный комплекс	скарново-магнетитовый	золото-магнетит-сульфидный	золото-сульфидно-карцевый		кальцитовый
Минеральная ассоциация	эпидот-гранат-магнетитовая	золото-халькопирит-пиритовая	кварц-золото-полисульфидная	золото-серебро-теллуридно-висмутовая	кальцитовая
Минералы	Гранат Пироксен Волластонит Магнетит I Эпидот	Кварц Пирит I Магнетит II Халькопирит I Сфалерит I Пирротин Золото I Кобальтин Алтаит Кальцит	Кварц Пирит II Арсенопирит Сфалерит II Халькопирит II Галенит Тетраэдрит Золото II	Кварц Теллуровисмутит Тетрадимит Цумоит Бенжаминит Золото III Серебро Кальцит	Кальцит

Рудные объекты Майского месторождения локализованы в восточном экзоконтакте одноименного гранодиорит-диоритового интрузивного массива в мощной зоне скарнирования и кварц-эпидот-хлоритовых, кварц-серицит-карбонатных метасоматитах (рис. 1).

На Майском месторождении проявлено два структурно-морфологических типа золоторудных тел: контактово-метасоматические залежи и минерализованные вкраплено-сульфидные зоны.

Контактово-метасоматические залежи представлены, как правило, скарновыми телами, по которым развиты магнетитовые тела (магнетит I), с последующим их дроблением и наложением золото-магнетит-сульфидной минерализации (табл.).

Основными рудными минералами золото-магнетит-сульфидного комплекса являются пирит, магнетит II и халькопирит. Содержание этих минералов колеблется в широких пределах и обычно составляет десятки процентов. К более редким, но характерным минералам этого комплекса, относятся пирротин и кобальтин. Пирротин развивается в виде вкрапленности, реже образует сливные руды.

Минерализованные зоны с золото-сульфидно-кварцевыми прожилково-вкрапленными рудами приурочены к зонам кварц-эпидот-хлоритовых, кварц-серицит-карбонатных метасоматитов, отнесенных нами к березитам. Они представлены кулисообразной системой крутопадающих жильно-прожилковых тел с неравномерно распределенной сульфидной минерализацией, пересекающие скарны и магнетитовые тела.

Рудные тела Семеновского участка представлены золото-сульфидно-кварцевыми линзами мощностью 0,1...0,7 м, редко более. Промежутки между жильными линзами выполнены сульфидизированными березитами, мощность которых достигает 10...15 м. Протяженность минерализованных зон метасоматитов варьирует от десятков до нескольких сотен метров (рис. 2). Зональность определяется сменой минерального и химического состава руд и метасоматитов по мощности, простиранию и падению рудных тел.

Вмещающие породы участка сложены вулканогенными породами нижнего кембрия (садринская свита). Гидротермальные изменения выражены зонами развития пропилитов и березитов. Они приурочены к структурам повышенной проницаемости, что проявляется в характере распределения рудных тел. Последние тяготеют к участкам пересечения кварцевых жил с зонами повышенной проницаемости, фиксируемых кварц-эпидот-хлоритовыми, кварц-серицит-карбонатными новообразованиями.

Минеральная зональность рудных тел всех участков является концентрической с последовательным сокращением объема продуктов рудоотложения от ранних ступеней минералообразования к поздним и приуроченностью последних к рудоподводящим зонам проницаемости (рис. 2). В центральных частях рудных тел проявлена наиболее поздняя золото-серебро-теллуридно-висмутовая ассоциация, представленная относительно низкотемпературными минералами: теллуровисмутит Bi_2Te_3, цумоит Bi_2Te_2 и тетрадимит Bi_2Te_2S. Из сульфосолей Ag-Bi обнаружен бенжаминит [4].

По мере удаления от центра рудных тел фиксируется более ранняя кварц-золото-полисульфидная ассоциация минералов: галенит, сфалерит, халькопирит, блеклая руда (табл.).

Характерно явное преобладание сурьмы над мышьяком в составе блеклой руды, что позволяет отнести ее к тетраэдриту. Галенит, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит развиваются в виде прожилков, секущих пирит и арсенопирит, иногда цементируют раздробленные зерна последних, либо нарастают на их грани и ребра. Последовательность выделения минералов этой ступени: сфалерит – халькопирит – галенит – тетраэдрит.

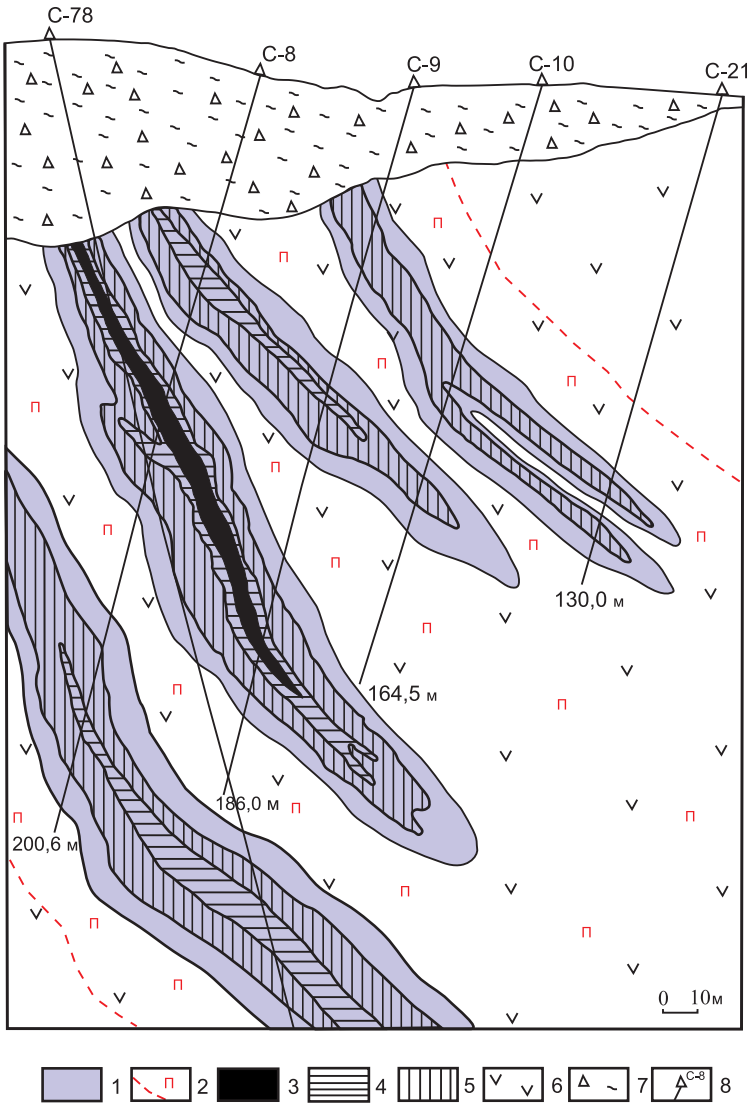


Рис. 2. *Метасоматическая зональность рудных тел уч. Семеновского по линии скважин № 78–8-9–10–21. 1) березиты с золото-сульфидно-кварцевой минерализацией; 2) пропилиты; 3–5) области развития минеральных ассоциаций: 3) теллуро-висмутит, цумоит, тетрадимит, бенжаминит; 4) сфалерит, халькопирит, галенит, тетраэдрит; 5) пирит и арсенопирит; 6) вулканогенно-осадочные образования; 7) кора выветривания; 8) скважины, рис. 1*

Периферия рудного тела фиксируется только наиболее ранним рудным минералом пиритом, который ближе к центру замещается и цементируется арсенопиритом. В арсенопирите отмечаются повышенные концентрации сурьмы (до 9 %), что свидетельствует в пользу малого эрозионного среза оруденения на Семеновском участке.

По простиранию рудных тел закономерно меняется термоЭДС пиритов, на периферии рудного тела преобладают пириты с дырочным типом проводимости, а в центральной части – с электронным [5]. Здесь же исчезают кристаллы пирита I морфологического типа (чистые кубы) и появляются сложные кристаллы куб-пентагондодекаэдрического и пентагон-октаэдрического габитусов. Их особенностью является развитие на всех кристаллах грани октаэдра, не встречающейся в участках преобладания свинцово-цинковой минерализации.

В целом, морфологическая зональность рудных тел является объемной, концентрической, центростремительной, с постепенным сокращением площади рудоотложения к концу процесса рудообразования.

Зональность месторождений

Большое количество жил, залежей рудного поля сконцентрированы в трех рудных участках. Они различаются геологической обстановкой и минерало-геохимическими особенностями руд и метасоматитов. Выделяются Майский, Правобережный и Семеновский участки, соответствующие по рангу месторождениям (рис. 1). Майское месторождение является собственно золото-скарновым, Правобережное и Семеновское проявления представлены пропилит-березитовыми зонами с прожилково-вкрапленной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией. Зональность этих объектов

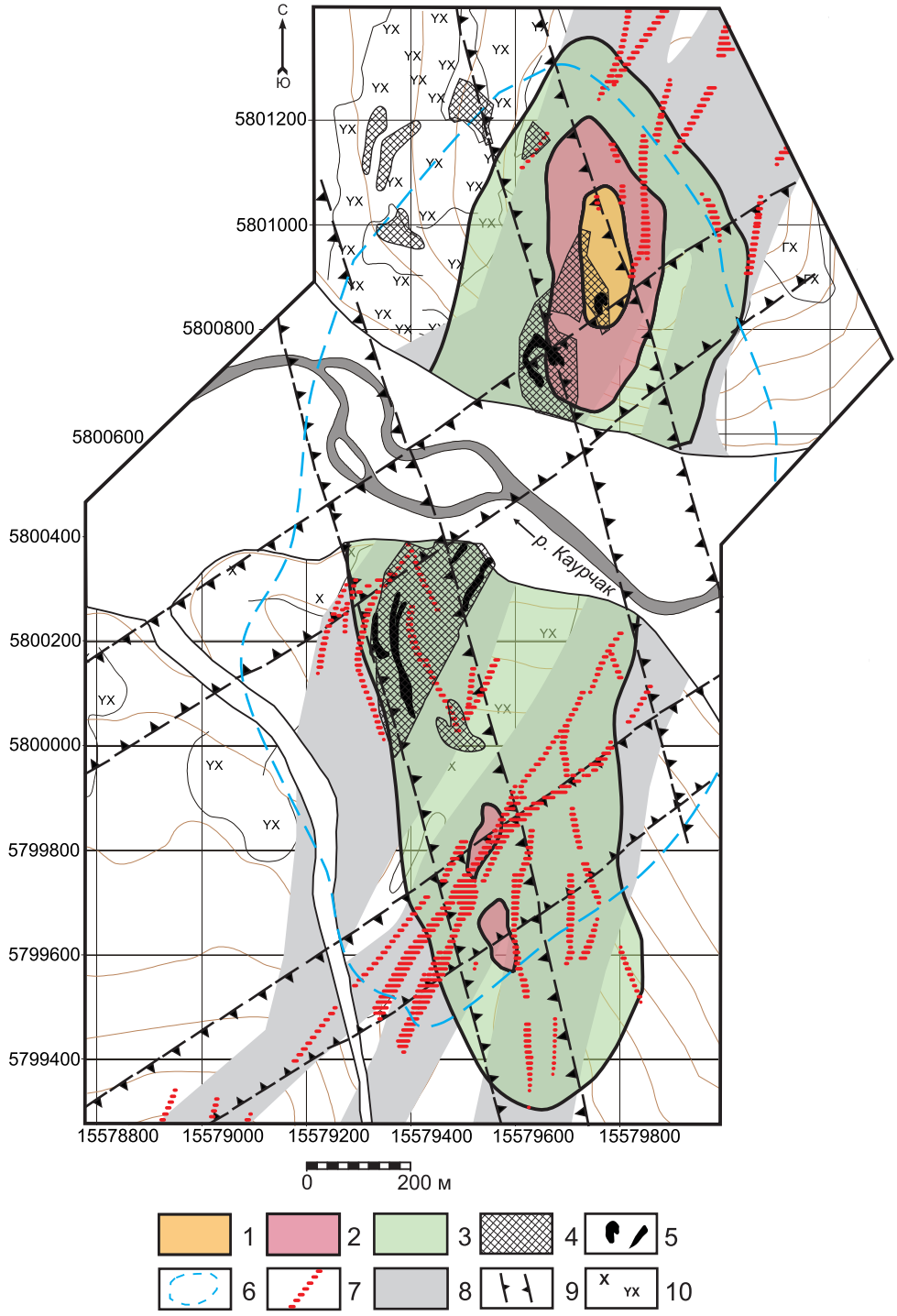


Рис. 3. *Поперечная зональность рудно-метасоматических образований в пределах уч. Майского: 1) центральная зона с золото-серебро-теллуридно-висмутовой минерализацией; 2) промежуточная зона с золото-полисульфидной минерализацией; 3) внешняя зона с пирит-арсенопритовой минерализацией; 4) известковые скарны; 5) магнетитовые тела; 6) область развития апоскарновых пропилитов с сопутствующей золото-магнетит-сульфидной минерализацией; 7) березиты с золото-сульфидно-кварцевой минерализацией; 8) линейные зоны пропилитов; 9) интрузивные образования; 10) тектонические зоны повышенной трещиноватости*

имеет как общие черты, так и специфические особенности.

Рудно-метасоматическая зональность Майского месторождения проявляется в зональности слагающих его рудных жил и залежей, различающихся по минералогическому составу. В центральной части месторождения на скарново-магнетитовые залежи наложено золото-магнетит-сульфидное оруденение первого этапа. Здесь же развиты крутопадающие маломощные зоны кварц-эпидот-хло-

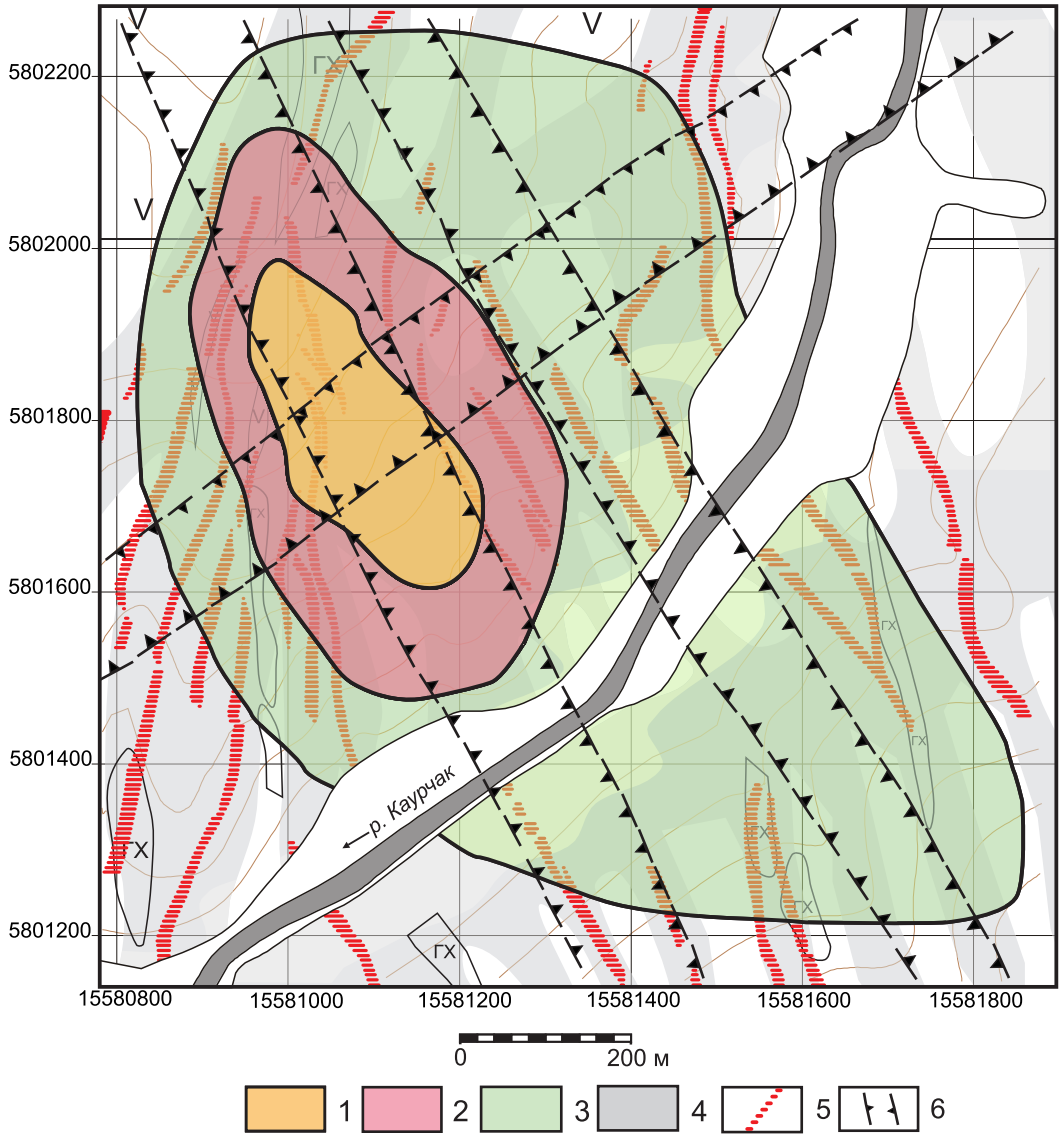


Рис. 4. *Минералогическая зональность руд участка Правобережного. Условные обозначения на рис. 3*

ритовых, кварц-серицит-карбонатных березитоподобных метасоматитов с золото-сульфидно-кварцевыми прожилково-вкрапленными рудами второго этапа. К периферии месторождения приурочены участки развития пропилитов с пиритовой минерализацией (рис. 3).

Для Правобережного и Семеновского рудопроявлений рудно-метасоматическая зональность выразилась в развитии линейных зон пропилитов с постепенным переходом в березиты, на которые наложено золото-сульфидно-кварцевое оруденение второго этапа.

Минеральная зональность руд наиболее контрастно проявилась по простиранию рудовмещающей структуры. В центральной части месторождения развиты: золото-серебро-теллуридно-висмутовая и кварц-золото-полисульфидная ассоциации, в промежуточной – пирит-арсенопиритовая вкрапленная минерализация, а внешняя часть характеризуется наличием участков с рассеянной пиритовой минерализацией (рис. 4). В том же направлении возрастает доля пиритов с дырочным типом проводимости.

Таким образом, зональность месторождений является центростремительной, с концентрацией поздних продуктивных парагенезисов в их центральных частях.

Зональность рудного поля

Эндогенная зональность рудного поля определяется совокупностью слагающих его рудных участков в сочетании с закономерным изменением состава метасоматитов. Она отражает эволюцию плутоногенной гидротермальной палеосистемы в целом.

Для рудного поля характерна поперечная зональность, которая обусловлена сочетанием моно- и многоактного механизмов ее формирования. При моноактном отложении зональность обычно центробежная, что отражает растекание растворов в сто-

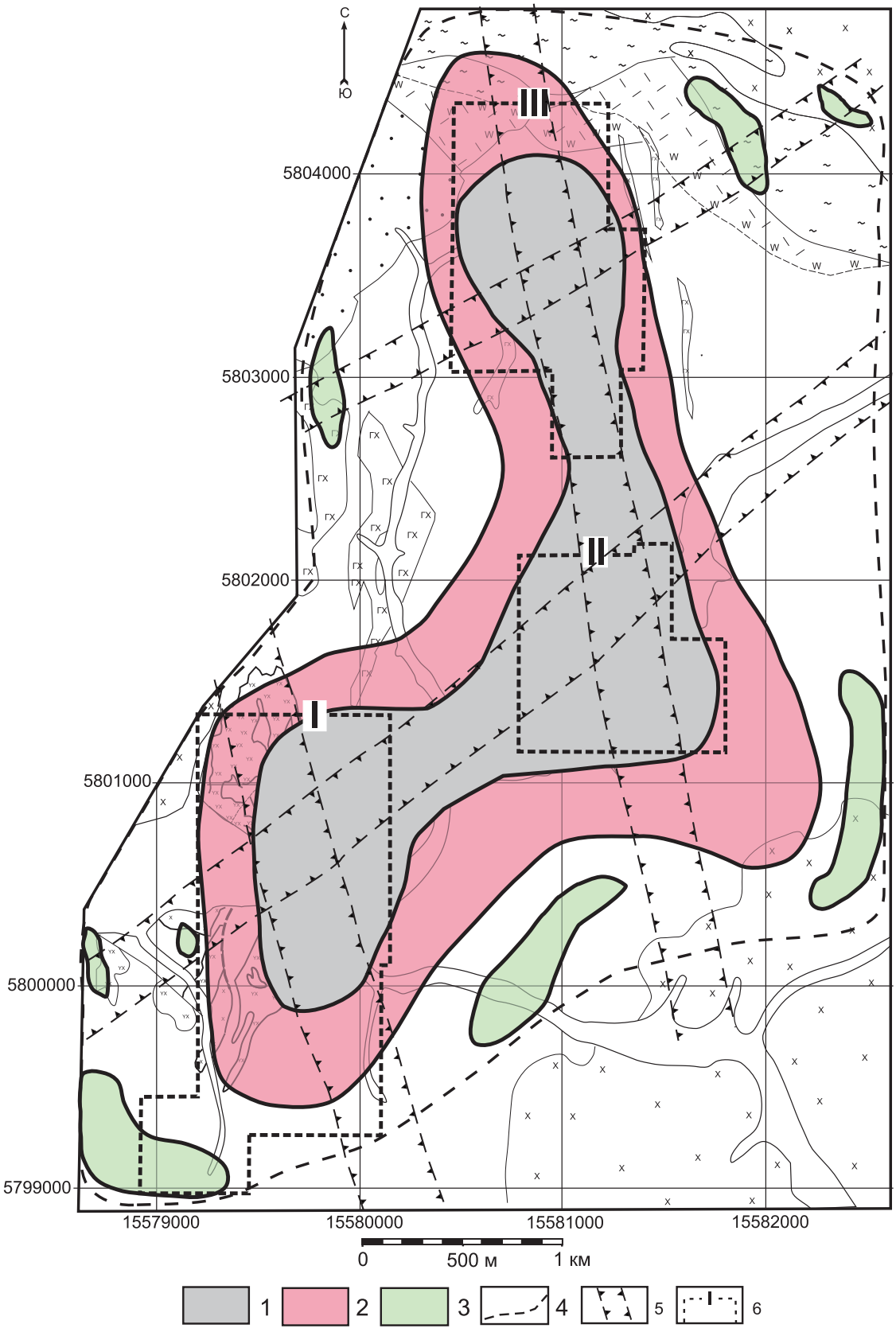


Рис. 5. *Поперечная рудно-метасоматическая зональность рудного поля: 1) центральная зона развития околорудных метасоматитов с золото-сульфидной минерализицией; 2) промежуточная зона: пропилиты и пирит-арсенопиритовая минерализация; 3) фронтальная зона с участками рассеянной притовой минерализацией; 4) предполагаемый контур внешней зоны; 5) зоны повышенной трещиноватости; 6) контуры рудных участков: I) Майский; II) Правобережный; III) Семеновский; остальные условные обозначения на рис. 1*

роны от подводящего канала и выражается в зональном размещении элементов-примесей в минералах руд и метасоматитов. При многоактном минералообразовании происходит перекристаллизация и очистка от микропримесей кварца, полевых шпатов, светлых слюд, сульфидов и относительное накопление сидерофильных и литофильных элементов в темноцветных (хлорит, эпидот, пироксен, амфибол) и акцессорных минералов преимущественно по периферии областей рудоотложения. Вследствие преобладающего сокращения объема рудообразующей системы в процессе ее эволюции, поперечная зональность квалифицируется как концентрическая, сходящаяся. Она выражается наличием в центральной зоне околорудных метасоматитов с золото-магнетит-сульфидной и золото-сульфидно-кварцевой минерализацией. Промежуточная зона рудного поля характеризуется развитием пропилитов с пирит-арсенопиритовой минерализацией, внешняя зона рудного поля представлена участками с рассеянной (непромышленной) минерализацией, преимущественно пиритовой (рис. 5). ТермоЭДС пиритов в целом сменяется с электронного на дырочный от центра к периферии рудного поля.

На фоне описанной поперечной зональности, связанной со структурными условиями рудоотложения, отчетливо фиксируется осевая зональность рудного поля, обусловленная снижением температуры рудоотложения с юга на север.

Проявлением осевой зональности оруденения является закономерное изменение минерального состава золотоносных зон и типоморфных свойств минералов с юга на север рудного поля. В общем виде рудная минерализация представлена следующим набором минералов: кварц, магнетит, пирит, арсенопирит, сфалерит, халькопирит, галенит, тетраэдрит, теллуриды и сульфосоли. Типоморфными минералами для Майского месторождения являются магнетит, пирротин и кобальтин. Для участков Правобережного и Семеновского характерно отсутствие магнетита и пирротина и возрастание роли поздних минералов: теллуровисмутита, тетрадимита, цумоита и бенжаминита.

Отмечается также тенденция увеличения пробности золота в ряду: участок Семеновский (среднее – 729 ‰) → Правобережный (786 ‰) → Майский (838 ‰) [6]. В целом, соотношение серебра и золота в рудах с юга на север рудного поля возрастает на порядок: от 1:1 до 10:1.

Эндогенная температурная зональность рудного поля находит отражение и в пространственном размещении метасоматитов. Кварц-полевошпатовые метасоматиты, известковые скарны и околоскарновые пропилиты развиты только на южном фланге рудного поля. Линейные пропилиты и околорудные березиты в наибольшей степени развиты в северной части рудного поля. В пределах рудного поля можно выделить три блока, каждый из которых обладает специфическими чертами рудно-метасоматической зональности: южный, центральный и северный.

Для *южного блока*, где располагается Майское месторождение, характерны следующие основные особенности: 1 – развитие площадных метасоматитов: кварц-полевошпатовых, скарнов и околоскарновых пропилитов; 2 – небольшая мощность околожильных кварц-серицит-карбонатных березитов (0,3...0,8 м); 3 – из рудных минералов характерны: магнетит, пирротин и кобальтин; 4 – золото крупное высокопробное, средняя проба 838 ‰; 5 – отношение Ag/Au в рудах 0,5...2.

Отличительными чертами *центрального блока*, куда входит участок Правобережный, являются: 1 – развитие пропилитов линейного типа и березитов; 2 – средняя мощность околожильных березитов 0,8...1,0 м; 3 – из рудных минералов кроме пирита, развиты сфалерит и галенит, реже встречаются халькопирит, тетраэдрит, теллуриды и сульфосоли; 4 – золото менее крупное, чем в ядерном блоке, средняя проба 786 ‰; 5 – отношение Ag/Au в рудах 3...5.

Северный блок включает участок Семеновский и обладает следующими специфическими особенностями: 1 – повышенная мощность околожильных березитов до 10...15 м; 2 – максимальное разнообразие рудной минерализации (пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, тетраэдрит, теллуровисмутит, тетрадимит, бенжаминит); 3 – золото мелкое (менее 0,1 мм), средняя проба 729 ‰; 4 – отношение Ag/Au в рудах 8...10.

Установлено, что латеральная зональность наиболее контрастно проявлена по простиранию оси удлинения рудного поля с юга на север, по мере удаления от Майского массива и комплекса позднедевонских габбро-монцонит-граносиенитовых интрузивов. Выявленная осевая зональность рудного поля указывает на парагенетическую связь оруденения с указанными интрузивными комплексами.

Выводы

Установлена рудно-метасоматическая зональность трех иерархических уровней: ранга рудного поля, месторождения и рудного тела. Выявленная поперечная зональность на всех уровнях классифицируется как концентрическая сходящаяся, с выделением в пределах рудоносных структур трех зон. В центральной зоне развиты околорудные метасоматиты с золото-магнетит-сульфидной и золото-сульфидно-кварцевой минерализацией. Промежуточная зона характеризуется развитием пропилитов с пирит-арсенопиритовой минерализацией. Для внешней зоны характерны участки с рассеянной (непромышленной) минерализацией. Поперечная зональность обусловлена структурными условиями локализации оруденения и отражает дифференцированный характер проницаемости геологических структур. На ее фоне зафиксирована осевая зональность рудного поля, обусловленная снижением температуры рудоотложения с юга на север по мере удаления от рудогенерирующих интрузивов. В масштабе рудного поля она выразi-

лась в закономерной смене высокотемпературных метасоматититов более низкотемпературными, в закономерном снижении пробы золота, увеличении отношения Ag/Au в рудах, изменении типоморфных свойств пирита и минералов метасоматитов. Все это свидетельствует о небольшом эрозионном срезе рудных участков и перспективе их на глубину.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки. АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)». Регистрационный номер: 2.1.1/12705.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нарсеев В.А. Теория эндогенной зональности рудных месторождений // Отечественная геология. – 1994. – № 5. – С. 3–10.
2. Санин В.Н. Модель золоторудных проявлений в структурах Майско-Лебедской площади, Республика Алтай // Руды и металлы. – 2009. – № 4. – С. 42–54.
3. Тимкин Т.В. Критерии локализации золотого оруденения в Майско-Лебедском рудном поле (Горная Шория) // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – Т. 48. – № 1. – С. 58–63.
4. Ворошилов В.Г., Санин В.Н., Тимкин Т.В. Аномальные геохимические поля зон сульфидной минерализации Майско-Лебедского золоторудного узла // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 36–41.
5. Коробейников А.Ф., Нарсеев В.А., Пшеничкин А.Я., Ревякин П.С., Арифулов Ч.Х. Пириты золоторудных месторождений. – М.: ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.
6. Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. – Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2006. – 339 с.

Поступила 18.03.2011 г.

УДК 552.11:552.3:550.4:550.93(571.51)

ГЕОХРОНОЛОГИЯ И МАГМАТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД И КАРБОНАТИТОВ ЮЖНОГО ЗААНГАРЬЯ, ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ

В.В. Врублевский, А.М. Сазонов*, И.Ф. Гертнер, П.А. Тишин, Ю.В. Колмаков**

Томский государственный университет
*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
**Томский политехнический университет
E-mail: labspm@ggf.tsu.ru

Производные мантийного магматизма в южном Заангарье Енисейского кряжа представлены среднетатарским ийолит-фойяитовым и пенченгинским фенит-карбонатитовым комплексами неопротерозоя. Начальные фазы их становления (~725…680 млн л назад) совпадают с одной из эпох плюмовой активности и рифтогенеза на окраине Сибирского палеоконтинента. Источники роданачальных магм по Nd-Sr-изотопным параметрам соответствуют материалу деплетированной мантии PREMA/FOZO-типа и E-MORB при некотором смешении с обогащенным веществом EM I. Предполагаются сходный геодинамический режим и изначальная пространственная сближенность проявлений позднедокембрийского мантийного щелочного магматизма Енисейского кряжа и Восточного Саяна.

Ключевые слова:
Щелочной магматизм, карбонатиты, мантийный плюм, Енисейский кряж.

Key words:
Alkaline magmatism, carbonatites, mantle plume, Yenisei Ridge.

Введение

В геологическом строении Енисейского кряжа принимают участие неопротерозойские разноформационные магматические комплексы и массивы щелочных пород и (или) карбонатитов, которые, предположительно, сформировались в обстановке пульсационной плюмовой активности и континентального рифтинга [1–4]. Согласно одной из существующих геодинамических моделей докембрийский складчато-надвиговый пояс Енисейского кряжа образовался в результате последовательной аккреции нескольких террейнов к окраине Сибирского кратона. При этом считается, что главные коллизионные события в интервалах 880...860 и 760...720 млн л назад сопровождались внедрением крупных гранитоидных интрузивов тейского, аяхтинского и глушихинского комплексов, расположенных в центральной и западной частях Заангарья [5, 6]. На этой территории выделяются два этапа коллизионного метаморфизма с возрастными пиками 862...849 и 802...798 млн л, а также стадии охлаждения горных пород, эксгумированных при надвигах, в диапазонах ~849...815 и ~795...773 млн л назад соответственно [7–9]. Предполагается, что на рубеже рифея – венда (~700...630 млн л назад), происходило присоединение к палеоконтиненту островодужных

комплексов и обдукция офиолитов Приенисейского пояса.

С этим этапом тектогенеза по времени совпадает формирование в регионе анорогенных гранитов татарского комплекса (650...630 млн л назад) [6], а также большинство проявлений щелочного и карбонатитового магматизма в диапазоне ~710...610 млн л назад. В Заангарской части Енисейского кряжа известно несколько центров такого магматизма неопротерозойского возраста – чапинский щелочной пикрит-лампроитовый, захребетнинский габбро-нефелинсиенитовый, чividинский трахибазальтовый, среднетатарский ийолит-фойяитовый, пенченгинский фенит-карбонатитовый комплексы, распространенность которых ограничивается Центрально-Ангарским террейном и приуроченностью к Татарско-Ишимбинской разломной зоне. Наряду с другими проявлениями внутриплитного магматизма Енисейского кряжа этого времени их можно сопоставить с эпохами предполагаемой рифтогенной деструкции на возрастных рубежах ~700 и 670...650 млн л [4].

Согласно представлениям [10], развитие позднерифейского-вендского щелочного магматизма на окраине Сибирского палеоконтинента, по-видимому, обусловлено деятельностью суперплюма, вызвавшего распад Лавразии (Родинии) и раскрытие Палеоазиатского океана. Для тектонической структуры Енисейского кряжа рассматривается также вероятность эволюции щелочного магматизма в неопротерозое в условиях аккреционных процессов на активной континентальной окраине [11]. По пенченгинскому фенит-карбонатитовому и среднетатарскому ийолит-фойяитовому комплексам в южном Заангарье, являющимся производными мантийного магматизма на Енисейском кряже, нами получены Ar-Ar-, Sm-Nd-, Rb-Sr-геохронологические даты, а также геохимические и изотопные данные, которые позволяют уточнить их возраст и последовательность формирования, установить источники карбонатитовых и фельдшпатоидных магм, оценить длительность процессов рифтогенеза и плюмовой активности на позднедокембрийском этапе геологического развития региона.

Геология и вещественный состав магматических комплексов

Пенченгинский фенит-карбонатитовый комплекс. Ареал распространения пород комплекса расположен в юго-западной части Центрально-Ангарского террейна на водоразделе верховий рек Большая Пенченга и Татарка, притоков рр. Большого Пита и Ангары. Пласто- и линзообразные тела карбонатитов и сопряженные с ними мощные фенитовые ореолы образуют протяженную (до 25 км при ширине 2...6 км) крутопадающую субмеридиональную зону вдоль Татарско-Ишимбинского разлома [12]. Они прорывают протерозойские мраморы и слюдяные кристаллосланцы пенченгинской и кординской свит, метабазиты индыглинского комплекса и находятся вблизи Татарского гранитного плутона (рис. 1). Крупные карбонатитовые линзы мощностью до 120...150 м или серии сближенных более мелких жил имеют субсогласное залегание относительно вмещающих метаморфизованных пород.

Наряду с линейной морфологией, одной из особенностей комплекса является отсутствие щелочных силикатных магматических пород, генетически связанных с карбонатитами. Последние характеризуются ассоциацией доминирующего ферродоломита (50...90 %) с магнезиоарфведсонитом и флогопитом (до 15...30 %), апатитом (до 10...15 %), более редкими пирротином, пирохлором, магнетитом, ильменорутилом, колумбитом, цирконом [2, 12]. По соотношению петрогенных компонентов (табл. 1) породы классифицируются как магнезиокарбонатиты. Они близки по составу к щелочно-доломитовым расплавам, которые равновесны с карбонатизированными мантийными перидотитами и обычно рассматриваются в качестве возможных первичных карбонатитовых магм. Суммарное содержание и дифференцированный характер распределения редких земель в породах (до ~1200...2000 г/т, La/Yb~80...140), также как и концентрации остальных гидромагматофильных элементов, вполне сопоставимы с составом среднего магнезиокарбонатита и других подобных образований. Вместе с тем, по сравнению с модельным источником OIB, считающимся эталоном внутриплитного магматизма, карбонатиты пенченгинского комплекса заметно обогащены фосфором, легкими РЗЭ, Nb, Sr, Th, U и обеднены барием, цирконием и гафнием (рис. 2) [2].

Среднетатарский ийолит-фойяитовый комплекс. В составе комплекса объединяются четыре массива щелочных пород, установленных в бассейне р. Татарки, притока Ангары на юго-западе Центрально-Ангарского террейна. Наиболее крупным (~17 км^2) из них является Заангарский ийолит-фойяитовый плутон (рис. 1) [13]. Интрузив имеет штокообразную форму и залегает среди верхнерифейских мраморизованных известняков и кристаллосланцев. В узкой (200...500 м) экзоконтактовой зоне вмещающие породы фенитизированы. В строении массива преобладают лейкократовые эгириновые фойяиты, жильная фация которых представлена щелочными сиенит-пегматитами, преимущественно развитыми в породах рамы. Значительно меньше распространены полевошпатовые ийолиты, относящиеся к другой интрузивной фазе. Они образуют субгоризонтальную пластовую залежь (2–3,4 км) мощностью до 300 м в центральной части плутона и мелкие сателлиты среди фойяитов. Контакты между ийолитами и нефелиновыми сиенитами имеют инъекционный характер. Формирование фойдолитов завершают жильные фойяит-пегматиты, сосредоточенные в контурах массива.

Северо-восточный эндоконтакт интрузии осложнен зоной мусковитовых сиенитов, более кремнекислых и с меньшим содержанием щелочей по сравнению с фойяитами. Все первично-магма-

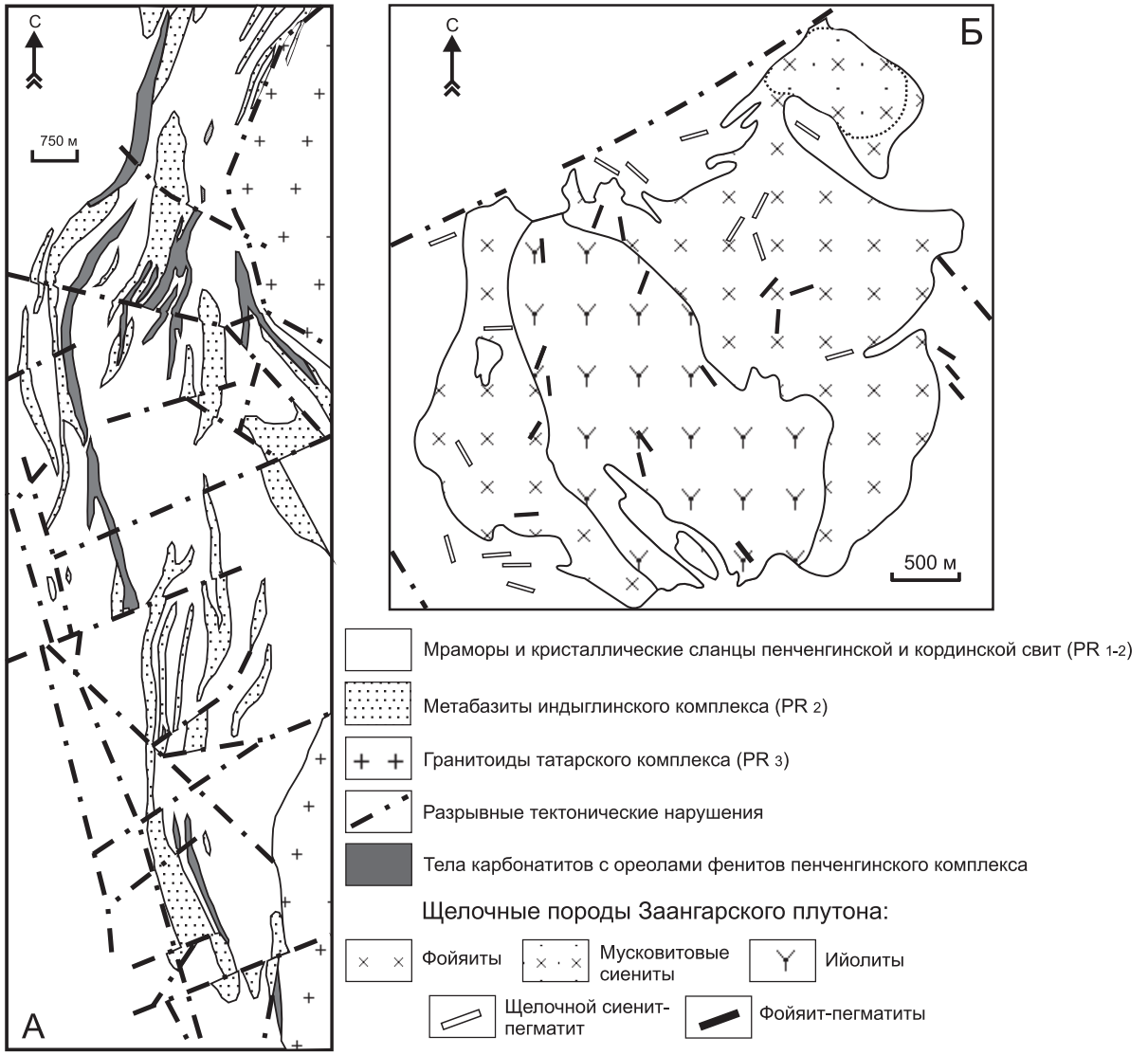


Рис. 1. *Геологические схемы пенченгинского комплекса (а) и Заангарского массива (б) (приведено по [3, 12] с изменениями)*

тические породы в разной степени подверглись микроклинизации и альбитизации. Поздне- и постмагматические изменения приводили к разнообразной редкометальной (Zr, Nb, Th, Li, TR) и рассеянной золото-платиноидной минерализации.

Развитые в пределах массива жильные силикатно-карбонатные образования по особенностям Nd-Sr-O-C-изотопного состава отнесены к мантийным карбонатитам [14]. Нефелинсодержащие породы Заангарского плутона при пониженной кремнекислотности (SiO_2~47...56 мас. %) обогащены Al_2O_3~18...22 мас. % и Na_2O+K_2O~11...14 мас. %; Na_2O/K_2O~1,2...2,2. Для более меланократовых ийолитов характерно увеличение концентраций фемических компонентов, кобальта и фосфора при сходных с фойяитами низких (до 12...16 г/т) содержаниях Cr, Ni, табл. 1. Вместе с тем, уровень накопления в них большинства HFS- и LIL-элементов примерно в 2...4 раза выше, чем в нефелиновых сиенитах, что при почти семикратном обогащении РЗЭ, 357...672 г/т, La/Yb~22...53, рис. 2, свидетельствует либо о различной природе магматических источников, либо о разных степенях смешения их вещества. Характер спектров распределения и соотношение редких элементов в ийолитах, Ba/Nb~4...9, Ba/La~9...12, La/Nb~0,5...0,8, Rb/Nb~0,6...0,9 сопоставимы с параметрами внутриплитного источника OIB. Кроме того, формирование фойяитов, Rb/Nb~2,5...4,6, Ba/La~16,5...20,6, по-видимому, происходило при участии корового компонента. Влияние этих источников в процессах магмогенеза заметно отразилось и на Nd-Sr-изотопном составе пород Заангарского массива.

Радиогенная геохронология пород и минералов

По данным K-Ar- и Rb-Sr-изотопного датирования флогопита и валовых проб пород возраст пенченгинского комплекса ранее устанавливался в диапазоне 640...660 млн л [12, 15]. Sm-Nd изохрона по составам карбонатита и его породообразующих амфибола, апатита и пирохлора соответствует возрасту 672±93 млн л ($\varepsilon_{Nd}(T)$=5,4) [2]. Для уточне-

Таблица 1. *Представительный химический состав щелочных пород и карбонатитов южного Заангарья*

Компонент	Т-3-35	Т-5-26/1	Т-0-3/1	Т-4-3	Т-8-22	Т-6-31	Т-5-26	С 86	72/182	50/278
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2	61,44	61,04	65,23	66,37	54,29	53,43	48,23	4,63	3,67	2,44
TiO_2	0,14	0,19	0,22	0,20	0,15	0,51	2,78	0,03	0,03	0,03
Al_2O_3	23,75	24,12	24,35	17,09	28,35	19,68	18,40	0,85	0,43	0,53
Fe_2O_3	2,85	2,18	1,26	8,49	3,16	9,96	10,35	6,35	6,77	4,55
MnO	0,14	0,11	<0,03	0,18	0,34	0,47	0,30	0,84	0,70	0,74
MgO	0,17	0,42	0,14	0,41	0,17	0,91	3,07	14,14	15,13	16,74
CaO	1,11	1,49	0,16	0,36	0,48	6,72	8,92	32,24	31,89	32,54
Na_2O	4,94	4,36	2,23	5,66	7,64	4,69	5,01	0,30	0,30	0,30
K_2O	3,36	4,19	4,51	0,25	2,89	2,32	1,94	0,78	0,19	0,05
P_2O_5	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,07	0,52	9,30	7,83	6,37
П.п.п.	1,18	0,84	1,46	0,39	1,74	0,56	0,58	29,59	31,66	34,93
Сумма	99,11	98,97	99,62	99,67	99,24	99,32	100,10	99,05	98,60	99,22
Cr	12	12	15	22	10	14	12	9,0	15	8,0
Ni	16	10	10	20	10	16	16	17	37	10
V	28	34	20	32	20	24	230	9,0	10	6,0
Co	1,0	1,0	0,6	1,4	0,8	4,5	14	7,0	7,0	4,0
Cs	2,8	2,5	1,0	0,2	5,8	0,7	2,5	0,8	0,1	0,1
Rb	283	282	579	21	316	142	197	37	4,3	0,2
Ba	341	547	313	75	31	2170	852	56	214	69
Sr	759	1124	64	105	680	3005	1472	6145	5898	6641
Nb	61	111	114	955	581	241	214	261	10266	26726
Ta	2,1	4,6	3,8	23,3	12,3	7,0	8,7	3,4	1168	1074
Zr	428	482	461	6328	3754	681	839	124	3,3	163
Hf	8,7	8,1	10	88	47	11	15	0,2	0,2	0,6
Y	8,2	11,5	60	66	320	37	51	71	65	78
Th	7,1	12,8	12,4	72	9,7	24	14	1,5	17	41
U	3,5	7,1	5,3	132	16,5	10	3,8	0,7	54	20
La	16,6	33,2	14,8	77	403	180	97	389	324	405
Ce	23,2	53,4	14	218	592	323	147	855	759	979
Pr	2,0	4,5	2,3	16,3	52	32	15,3	93	86	113
Nd	5,5	12,3	6,4	47	155	97	53	310	300	349
Sm	0,8	2,0	1,3	11	30	12,3	9,8	60	59	58
Eu	0,2	0,4	0,3	2,8	9,8	3,5	3,1	14	13	16
Gd	0,7	1,5	2,0	8,1	34	7,7	9,1	41	39	47
Tb	0,1	0,3	0,6	1,5	7,1	1,1	1,4	6	5,2	5,4
Dy	0,9	1,6	6,3	11	52	6,1	8,5	22	20	24
Ho	0,2	0,3	1,7	3,0	12,4	1,2	1,7	3,3	3,1	3,3
Er	0,7	1,1	5,4	12,4	40	3,3	4,7	7,2	6,5	7,2
Tm	0,1	0,2	0,8	2,6	6,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,6
Yb	1,1	1,7	4,0	20	40	3,4	4,4	3,0	2,8	2,9
Lu	0,2	0,3	0,5	3,1	5,0	0,5	0,6	0,3	0,3	0,4

1–7 – щелочные породы Заангарского плутона: фойяиты (1, 2), мусковитовый сиенит (3), сиенит-пегматит (4), фойяит-пегматит (5), фойдолиты (6, 7); 8–10 – карбонатиты пенченгинского комплекса. Содержание петрогенных (рентгенофлюоресцентный анализ, мас. %) и редких (ICP-MS, г/т) элементов определялось в Аналитических центрах ИГМ СО РАН (Новосибирск) и ИМГРЭ (Москва).

ния времени формирования комплекса проведен Ar-Ar-изотопный анализ магнезиоарфведсонита и флогопита из карбонатитов. Полученные спектры выделения аргона характеризуются хорошо выраженными плато с возрастом 725,9±6,3 млн л для амфибола и 637,6±5,7 млн л для слюды [16]. Очевидно, такие существенные различия свидетельствуют о полихронном характере формирования комплекса. При этом Ar-Ar-изотопная дата ~726 млн л представляется наиболее реальной для оценки времени его главной фазы. Она также совпадает с K-Ar-изотопным возрастом амфибола (720...725 млн л) из карбонатитов зиминского щелочно-ультраосновного комплекса неопротерозоя в Урикско-Ийском грабене Восточного Саяна [17].

По свидетельству А.Д. Ножкина с соавторами [4] именно в диапазоне 725...730 млн л назад в пределах Енисейского кряжа происходило заложение рифтогенных структур одной из эпох тектоно-магматической активизации. Вероятно, с данным событием связано и становление пенченгинского комплекса. Значительно более молодой Ar-Ar-изо-

топный возраст проанализированного флогопита (~638 млн л) вполне объясним, если сопоставить его по времени с формированием Татарского гранитного массива, вблизи которого расположены тела пенченгинского комплекса. По данным U-Pb-изотопного датирования циркона гранитообразование происходило приблизительно 630 млн л назад [6]. Нами предполагается, что количества тепла и флюидов, выделяемых при становлении такого крупного по размерам гранитоидного интрузива как Татарский (~150 км^2), вполне достаточно для частичного переплавления материала более ранних карбонатитов. Возможно также, что омоложение возраста обусловлено только их повторным нагревом при термическом воздействии остывающей гранитной магмы, вызвавшим перестройку изотопной системы именно флогопита, температура закрытия которого значительно меньше, чем у амфибола.

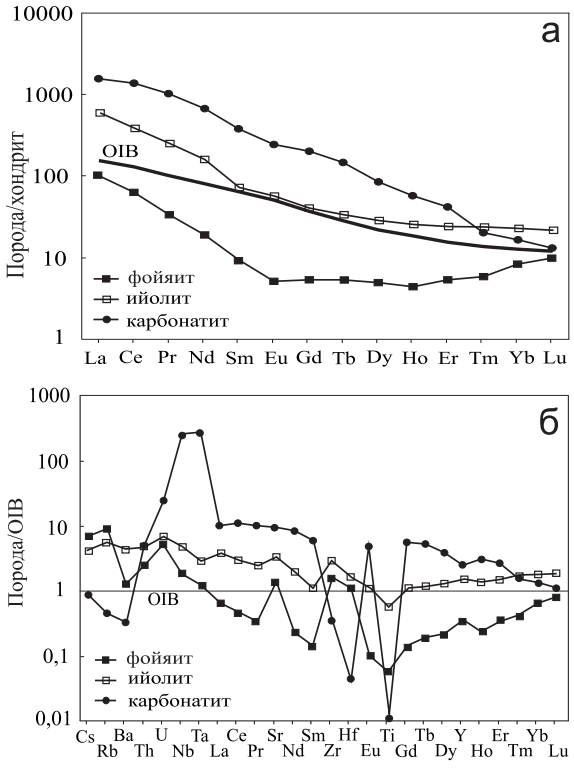


Рис. 2. *Распределение РЗЭ (а) и редких элементов (б) в карбонатитах и щелочных породах пенченгинского комплекса и Заангарского плутона. Средние концентрации элементов в породах нормированы к составам хондрита CI и базальтов океанических островов (OIB) по Sun&McDonough*

Результаты K-Ar-изотопного датирования Заангарского плутона [13] предполагают более позднее внедрение нефелиновых сиенитов (~660 млн л назад) по сравнению с ийолитами (675±27 млн л). Полученные нами данные свидетельствуют об иной последовательности и длительности формирования этого массива [3]. Rb-Sr-изохрона по эгирину, альбиту, флюориту и валовому составу фойяитов (обр. 3–35, табл. 2) соответствует возрасту 678±7,9 млн л (I_{Sr}=0,702715, MSWD=1,48), характеризуя их как самую раннюю интрузивную фазу. С учетом валовых составов фойяитов (обр. 5–26/1, 8–23) и щелочного сиенит-пегматита (жильная фация фойяитов, обр. 4–3) получается более сбалансированная изохрона с возрастом 675±5,8 млн л (I_{Sr}=0,70273, MSWD=0,94). Близкие датировки (T=680±61 млн л, MSWD=0,04, ε_{Nd}=5,3 и T=678±72 млн л, MSWD=1,5, ε_{Nd}=5,2) получены при изучении Sm-Nd-изотопных систем тех же образцов (табл. 2). U-Pb – изотопный возраст нефелиновых сиенитов по сфену и циркону составляет 700...711 млн л [11], что сопоставимо со временем формирования карбонатитов пенченгинского комплекса (~726 млн л назад), а также базитов повышенной щелочности Захребетнинской вулканотектонической структуры (~703 млн л назад) в северном Заангарье [4, 16]. Образование полевошпатовых ийолитов происходило значительно позднее, что, очевидно, указывает на полихронный характер становления Заангарского плутона. Эгирин, биотит и валовый состав фойдолитов (обр. 5–26, табл. 2) образуют Rb-Sr-изохрону с возрастом 611±7,2 млн л (I_{Sr}=0,702548, MSWD=0,59). В комбинации с еще двумя валовыми пробами фойдолитов и фойяит-пегматитом наклон регрессионной прямой практически не изменяется (T=610±7 млн лет, MSWD=0,74, I_{Sr}=0,702656) [3].

Nd-Sr изотопная систематика и источники вещества щелочных пород и карбонатитов

Изотопный анализ неодима и стронция в щелочных породах и карбонатитах проводился на масс-спектрометрах Finnigan MAT-262, TRITON-TI в ИМГРЭ (Москва) и ИГГД РАН (Санкт-Петербург) в статическом режиме измерений по стандартной методике. Его результаты приведены в табл. 2.

Первичное отношение изотопов стронция в амфиболе и апатите из карбонатитов пенченгинского комплекса характеризуется очень низкими значениями ($^{87}Sr/^{86}Sr)_T$~0,70228...0,70235, сопоставимыми с параметрами MORB (Middle Oceanic Ridge Basalts)-резервуара. В породообразующем ферродоломите эта величина не намного выше (0,7025...0,7026) [2, 12] Очевидно, что наиболее полно состав источника карбонатитов отражает отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в апатите – главном концентраторе стронция (12040 г/т). Наряду с $\varepsilon_{Sr}(T)$~–(19,4...20,4), установленный радиогенный изотопный состав неодима пород и минералов пенченгинского комплекса, $\varepsilon_{Nd}(T)$~(5,1...5,5), свидетельствует о глубинной природе карбонатитового вещества, его возможном комбинированном источнике в умеренно деплетированной мантии типа PREMA/FOZO (Prevalent Mantle/Focus Zone)+E-MORB (Enriched Middle Oceanic Ridge Basalts) при некотором смешении с материалом EM I (Enriched Mantle I), рис. 3. Подобная гетерогенность устанавливается для большинства карбонатитсодержащих магматических комплексов мира [18, 19 и др.]. При этом компо-

Таблица 2. *Nd-Sr-изотопный состав щелочных пород и карбонатитов южного Заангарья*

Образец, порода	Материал	Sm, г/т	Nd, г/т	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_T$	$\varepsilon_{Nd}(T)$	$T(Nd)_{DM}$ млн л
Заангарский плутон								
3-35, Ф	Вс	2,347	14,23	0,09968	0,512460±3	0,512017	+4,98	922
	Аб	0,130	0,918	0,08548	0,512410±10	0,512030	+5,24	
	Эг	3,120	20,49	0,09201	0,512437±17	0,512028	+5,20	
	Фл	2,816	19,73	0,11226	0,512529±6	0,512030	+5,24	
8-23, Ф	Вс	0,744	5,133	0,08759	0,512413±3	0,512024	+5,12	890
5-26/1, Ф		2,869	19,52	0,08887	0,512395±6	0,512000	+4,65	922
4-3, СП		18,32	88,31	0,12537	0,512586±14	0,512029	+5,22	973
5-26, И		11,15	60,68	0,11108	0,512529±7	0,512085	+4,61	922
4-6, И		6,705	35,45	0,11435	0,512511±3	0,512054	+4,01	980
6-31, И		15,42	122,9	0,07585	0,512369±4	0,512066	+4,24	864
8-22, ФП		129,6	663,0	0,11816	0,512496±2	0,512023	+3,40	1043
Пенченгинский комплекс								
50/278, К	Вс	60,2	359	0,10147	0,512481±7	0,512035	+5,10	910
	Пир	67,7	693	0,05901	0,512299±5	0,512040	+5,19	
	Амф	1,29	9,63	0,08103	0,512412±6	0,512056	+5,51	
50/254, К	Ап	262	1487	0,10650	0,512517±5	0,512049	+5,37	
Образец, порода	Материал	Rb, г/т	Sr, г/т	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_T$	$\varepsilon_{Sr}(T)$	
Заангарский плутон								
3-35, Ф	Вс	275,8	808,4	0,98747	0,712392±16	0,702837	−12,41	
	Аб	322,0	414,5	2,25122	0,724387±8	0,702602	−15,75	
	Эг	30,49	1444	0,06105	0,703288±5	0,702697	−14,40	
	Фл	9,362	9401	0,00288	0,702715±17	0,702687	−14,54	
8-23, Ф	Вс	447,5	392,1	3,31095	0,734498±13	0,702459	−17,78	
5-26/1, Ф	Вс	235,9	1349	0,50594	0,707568±10	0,702672	−14,75	
4-3, СП	Вс	13,78	119,1	0,33467	0,705995±20	0,702757	−13,54	
5-26, И	Вс	247,7	1530	0,46846	0,706531±12	0,702453	−18,86	
	Эг	78,47	1561	0,14543	0,703908±31	0,702642	−16,17	
	Би	1112	365,9	8,85386	0,779708±7	0,702628	−16,37	
4-6, И	Вс	203,2	2024	0,29046	0,705140±7	0,702611	-16,61	
6-31, И	Вс	166,3	3193	0,15065	0,703988±13	0,702677	−15,67	
8-22, ФП	Вс	192,1	2952	0,18827	0,704517±6	0,702878	−12,82	
Пенченгинский комплекс								
50/278, К	Амф	1,02	203	0,0146±4	0,702485±11	0,702346	−19,40	
50/254, К	Ап	0,17	12040	0,00004±5	0,702278±9	0,702278	−20,36	

(Ф) фойяит, (И) полевошпатовый ийолит, ювит, (СП) сиенит-пегматит, (ФП) фойяит-пегматит, (К) карбонатит, (Вс) валовый состав породы, (Эг) эгирин, (Аб) альбит, (Би) биотит, (Фл) флюорит, (Ап) апатит, (Амф) амфибол, (Пир) пирохлор. Стандарты и методика расчета изотопных параметров приведены в [2, 3].

нент PREMA/FOZO может являться главной составляющей суперплюмов, определяющих значительную длительность и эволюцию мантийного, в том числе щелочного и карбонатитового, магматизма Северной Азии [10, 20, 21]. Судя по отношениям стабильных изотопов углерода, кислорода, серы и водорода становление пенченгинского комплекса не сопровождалось значительной коровой контаминацией, как это нередко наблюдается для многих проявлений карбонатитов складчатых областей [2].

По-видимому, аналогичное мантийное вещество послужило главным компонентом щелочных пород и карбонатитов Заангарского плутона [3] Несмотря на существенную разницу в возрасте, слагающие его нефелиновые сиениты, $\varepsilon_{Nd}(T)$=4,7...5,2; $\varepsilon_{Sr}(T)$=–(12,4...17,8), фойдолиты, $\varepsilon_{Nd}(T)$=4,0...4,6; $\varepsilon_{Sr}(T)$=–(15,7...18,9), карбонатиты, $\varepsilon_{Nd}(T)\approx$5,5; $\varepsilon_{Sr}(T)\approx$–18,5, имеют сходный Nd-Sr-изотопный состав с параметрами, близкими к породам пенченгинского комплекса (рис. 3). Это может указывать на родство мантийных источников

родоначальных фельдшпатоидной и щелочно-доломитовой магм, представляющих продукты смешения типа PREMA/FOZO+E–MORB+EM I. Наблюдаемые изотопные зависимости вполне допустимо рассматривать как результат плюм-литосферного взаимодействия, в ходе которого обычны проявления рифтинга и инициированного щелочного и карбонатитового магматизма.

Относительно синхронными являются неопротерозойские (630...725 млн л) рифтогенные ассоциации щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов в Урикско-Ийском грабене Восточно-Саянской провинции, которые имеют не только сходный с Заангарским массивом и пенченгинским комплексом Nd-Sr-изотопный состав (рис. 3), но и близкие модельные ($T(Nd)_{DM}$~0,83...0,96 млрд л) датировки [14, 22], косвенно свидетельствующие о родственной природе их источников. Наблюдаемые композиционные отличия могут быть обусловлены неодинаковой степенью смешения компонентов деплетированной мантии с EM I.

С позиции плейттектоники значительно более позднее (~610 млн л) образование ийолитов Заангарского плутона при их обогащенности редкими элементами, пространственной сопряженности и изотопном подобии с фойяитами предпочтительнее рассматривать как следствие повторного частичного плавления литосферной мантии, уже эродированной и метасоматически измененной под воздействием инициального плюма [23].

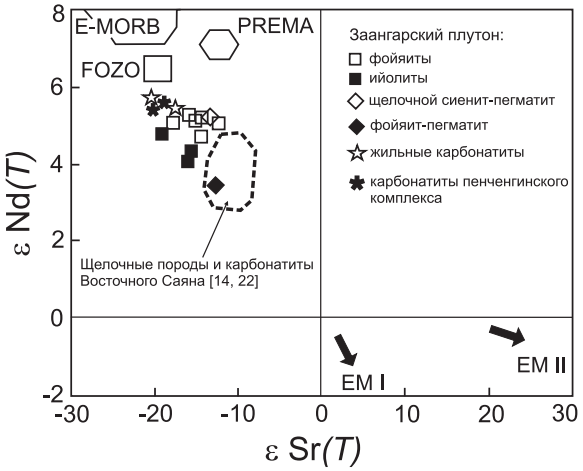


Рис. 3. *Nd-Sr-изотопный состав щелочных пород и карбонатитов южного Заангарья на Енисейском кряже. Мантийные резервуары E-MORB, PREMA, FOZO, EMI, EMII приведены в соответствии с их современными изотопными параметрами по Zindler&Hart, Stracke*

Несмотря на происходивший флюидный массоперенос и обогащение редкими элементами, к моменту выплавления фойдолитовой магмы изотопные системы литосферного субстрата не успевали придти к новому равновесию. По-видимому, мусковитовые сиениты северо-восточного эндоконтакта массива, имеющие возраст 630±4,5 млн л (Rb–Sr, I_{Sr}=0,70640, MSWD=1,69) [3], не являются самостоятельной интрузивной фазой. Учитывая существенно радиогенный изотопный состав стронция пород, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T$≈0,706...0,707, $\varepsilon_{Sr}(T)$≈32...44, и относительно древний модельный возраст $T(Nd)_{DM}$≈1,1 млрд л, они могут представлять собой продукты гидротермально-метасоматической мусковитизации фойяитов под воздействием флюида с коровой компонентой. Как и в случае пенченгинского комплекса, возможен также вариант перестройки изотопной системы при повторном нагреве под тепловым воздействием более молодых (650...630 млн л назад) гранитоидных интрузий татарского комплекса.

Заключение

Интрузивные массивы щелочных пород и карбонатитов южного Заангарья представляют собой полихронные магматические комплексы неопротерозойского возраста, начальные фазы становления которых происходили в диапазоне ~725...680 млн л назад, что по времени совпадает с одной из эпох плюмовой активности и рифтогенеза на окраине Сибирского палеоконтинента. По-видимому, сравнительно синхронно развивались центры магматизма повышенной щелочности, расположенные в северной части Енисейского кряжа. Источники первичных фельдшпатоидной и карбонатитовой магм по своим изотопно-геохимическим параметрам соответствовали материалу PREMA/FOZO – плюмового компонента и E-MORB, в различной степени смешанного с веществом обогащенной литосферной мантии EM I. Предполагается пульсационное внедрение фойдовых расплавов с интервалом ~70 млн л (Заангарский плутон). Такой телескопированный характер геохимически сходных интрузивных фаз возможен только в условиях повторного плавления нижней литосферы, уже эродированной плюмом. Сходство Nd-Sr-изотопного состава и времени образования щелочных пород и карбонатитов Енисейского кряжа и Восточного Саяна позволяют предполагать не только одинаковый геодинамический режим развития позднерифейско-вендского мантийного щелочного магматизма в регионах, но и изначальную пространственную сближенность его проявлений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013 гг.», АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы 2009–2011 гг.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнев Т.Я., Качевский Л.К., Ножкин А.Д., Даценко В.М., Стороженко А.А., Заблоцкий К.А., Романов А.П. Рабочая схема корреляции магматических и метаморфических комплексов Енисейского кряжа // Региональные схемы корреляции магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области / под ред. В.Л. Хомичева. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1999. – С. 17–46.
2. Врублевский В.В., Покровский Б.Г., Журавлев Д.З., Аношин Г.Н. Вещественный состав и возраст пенченгинского линейного комплекса карбонатитов, Енисейский кряж // Петрология. – 2003. – Т. 11. – № 2. – С. 145–163.
3. Сазонов А.М., Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Федорова А.В., Гавриленко В.В., Звягина Е.А., Леонтьев С.И. Заангарский щелочной интрузив, Енисейский кряж: Rb-Sr-, Sm-Nd-изотопный возраст пород и источники фельдшпатоидных магм в позднем докембрии // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 413. – № 6. – С. 798–802.
4. Ножкин А.Д., Туркина О.М., Баянова Т.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Постников А.А., Травин А.В., Эрнст Р.Е. Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. – № 7. – С. 666–688.
5. Vernikovsky V.A., Vernikovskaya A.E., Kotov A.B., Salnikova E.B., Kovach V.P. Neoproterozoic accretionary and collisional events on the western margin of the Siberian Craton: new geological and geochronological evidence from the Yenisey Ridge // Tectonophysics. – 2003. – V. 375. – № 1–4. – P. 147–168.
6. Верниковский В.А., Верниковская А.Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 1. – С. 35–52.
7. Лиханов И.И., Козлов П.С., Полянский О.П., Попов Н.В., Ревердатто В.В., Травин А.В., Вершинин А.Е. Неопротерозойский возраст коллизионного метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа (по ^{40}Ar–^{39}Ar-данным) // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 412. – № 6. – С. 799–803.
8. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Травин А.В. Верхнерифейский возраст кианит-силлиманитового метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа (по ^{40}Ar–^{39}Ar-данным) // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 433. – № 6. – С. 796–801.
9. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Травин А.В. Скорость эксгумации пород неопротерозойских коллизионных метаморфических комплексов Енисейского кряжа // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 435. – № 3. – С. 372–377.
10. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 404. – № 3. – С. 400–406.
11. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Верниковская И.В., Матушкин Н.Ю., Ясенев А.М. Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 419. – № 1. – С. 90–94.
12. Лапин А.В., Плошко В.В., Малышев А.А. Карбонатиты зоны Татарского глубинного разлома на Енисейском кряже // Геология рудных месторождений. – 1987. – № 1. – С. 30–45.
13. Свешникова Е.В., Семенов Е.И., Хомяков А.М. Заангарский щелочной массив, его породы и минералы. – М.: Наука, 1976. – 80 с.
14. Morikiyo T., Miyazaki T., Kagami H., Vladykin N.V., Chernysheva E.A., Panina L.I., Podgornych N.M. Sr, Nd, C and O isotope characteristics of Siberian carbonatites // Alkaline magmatism and the problems of mantle sources: Proc. Intern. Workshop / Ed. N.V. Vladykin. – Irkutsk, 2001. – P. 69–84.
15. Собаченко В.Н., Плюснин Г.С., Сандимирова Г.П., Пахольченко Ю.А. Рубидий-стронциевый возраст приразломных щелочных метасоматитов и гранитов Татарско-Пенченгинской зоны (Енисейский кряж) // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 287. – № 5. – С. 1220–1224.
16. Врублевский В.В., Ревердатто В.В., Изох А.Э., Гертнер И.Ф., Юдин Д.С., Тишин П.А. Неопротерозойский карбонатитовый магматизм Енисейского кряжа, Центральная Сибирь: $^{40}Ar/^{39}Ar$-геохронология пенченгинского комплекса // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 437. – № 4. – С. 514–519.
17. Кононова В.А. Якупирангит-уртитовая серия щелочных пород. – М.: Наука, 1976. – 215 с.
18. Bell K., Simonetti A. Source of parental melts to carbonatites-critical isotopic constraints // Mineralogy and Petrology. – 2010. – V. 98. – № 1–4. – P. 77–89.
19. Harmer R.E., Gittins J. The case for primary, mantle-derived carbonatite magma // Journal of Petrology. – 1998. – V. 39. – № 11–12. – P. 1895–1903.
20. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатсткий суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. – 2000. – № 5. – С. 3–29.
21. Добрецов Н.Л. Мантийные плюмы и их роль в формировании анорогенных гранитоидов // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 12. – С. 1243–1261.
22. Чернышова Е.А., Морикио Т. Характеристика источника щелочных пород карбонатитовых комплексов Присаянья по данным изотопного состава Nd и Sr в породах дайковой серии // Доклады Академии наук. – 1999. – Т. 369. – № 3. – С. 381–384.
23. Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Владимиров А.Г., Руднев С.Н., Борисов С.М., Левченков О.А., Войтенко Д.Н. Геохронологические рубежи и геодинамическая интерпретация щелочно-базитового магматизма Кузнецкого Алатау // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 398. – № 3. – С. 374–378.

Поступила 04.05.2011 г.

УДК 552.2+550.4(571.513)

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕВОНСКИХ БАЗАЛЬТОВ ИДОЛЕРИТОВ ШИРА-ШУНЕТСКОГО РАЙОНА МИНУСИНСКОГО ПРОГИБА

А.А. Воронцов, Г.С. Федосеев*

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск
E-mail: voron@igc.irk.ru
*Новосибирский государственный университет
*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: fedoseev@igm.nsc.ru

Приведены данные о строении Шира-Шунетского района Чебаково-Балахтинской впадины Минусинского прогиба и рассмотрены геохимические и Sr-Nd изотопные особенности базитов. Установлено, что по содержанию петрогенных и редких литофильных элементов разнофациальные базиты близки между собою, что свидетельствует об их происхождении из общего магматического источника. Показано, что состав источника обладает промежуточными характеристиками между составами внутриплитных источников типа OIB и источников типа IAB, обычных для магматизма конвергентных границ литосферных плит.

Ключевые слова:
Девонский магматизм, Минусинский прогиб, базальт, долерит, магматические источники.

Key words:
Devonian magmatism, Minusinsk trough, basalt, dolerite, magmatic sources.

Введение

В эволюции литосферы юго-западного складчатого обрамления Сибирской платформы важную роль сыграла девонская эпоха, поскольку в это время происходили масштабные магматические события, сопряженные с развитием многочисленных континентальных рифтов. Одним из таких рифтов является Минусинский прогиб, охватывающий территорию площадью более 50 тыс. км^2 между горными сооружениями Кузнецкого Алатау, Западного и Восточного Саян. Прогиб заполнен вулканогенно-осадочными комплексами, в которых широко распространены девонские магматические породы основного состава (базиты) быскарской серии, формирующие тела пластовой формы.

Установление генезиса базитов связано с двумя проблемами: определением фациальной природы пластовых тел и вещественного состава их магматических источников. Очевидно, что пластовые тела базитов представлены как покровными базальтами, так и долеритовыми силлами [1]. Однако количественные соотношения между покровами и силлами не установлены, поскольку эти образования обладают неотличительными (конвергентными) геологическими признаками [2]. В то же время, в ряде районов наличие долеритовых силлов не вызывает сомнений: заливы Сисимский, Усть-Коксинский, Убейский и Черемшанский, Копьевское и Новоселовское поднятия, район поселка Старый Борец и горы Карагай (рис. 1). К числу таких объектов относится также и Шира-Шунетский район с геологическими учебными полигонами четырех сибирских вузов – ТПУ, ТГУ, НГУ и ГУЦМИЗ. Этот район, на котором в течение полувека прошли практику десятки тысяч студентов, был выбран нами в качестве реперного объекта для геологической характеристики и оценки составов источников покровных базальтов и долеритовых силлов.

Геологическая и изотопно-геохимическая характеристики базальтов и долеритов

Шира-Шунетский район находится в юго-западной части Чебаково-Балахтинской впадины и включает в себя Ширинско-Марченгашский и Шунет-Матаракский участки (рис. 1).

На Ширинско-Марченгашском участке разрез раннедевонских отложений начинается сохочульской свитой, залегающей на гранитоидах уленьтуимского комплекса (рис. 2, *а*). В составе свиты преобладают трахиандезитовые лавобрекчии и туфоконгломераты, перекрытые пачкой чередующихся туфов и туфолав среднего состава с редкими прослоями туфогравелитов, туфопесчаников и алевролитов. В нижней части имеется пластовое тело крупнопорфировых долеритов [3]. Среди отложений верхней части свиты отмечены послойные тела трахириодацитов, базальтов и трахибазальтов, а также силлы и мелкие штоки долеритов.

Вышезалегающая придорожная свита состоит из трех пачек. Нижняя представлена пестроцветными конгломератами, песчаниками и алевролитами с флорой, кремнистыми туффитами, пепловыми и гравийными туфами, строматолитовыми известняками. В составе средней пачки участвуют строматолитовые известняки, красноцветные песчаники и долеритовые силлы. В верхней пачке распространены пестроцветные алевролиты, аргиллиты и песчаники, красноцветные гравийные туфы, окремненные известняки с флорой, базальтовые лавобрекчии с пиробитумами, выполняющими миндалины и прожилки. Марченгашская свита, залегающая с предполагаемым скрытым несогласием на придорожной, является в известном смысле уникальной для данного региона. В состав этой свиты включены базальты, андезитобазальты и трахибазальты, содержащие прослои и линзы красноцветных песчаников с флорой, гра-

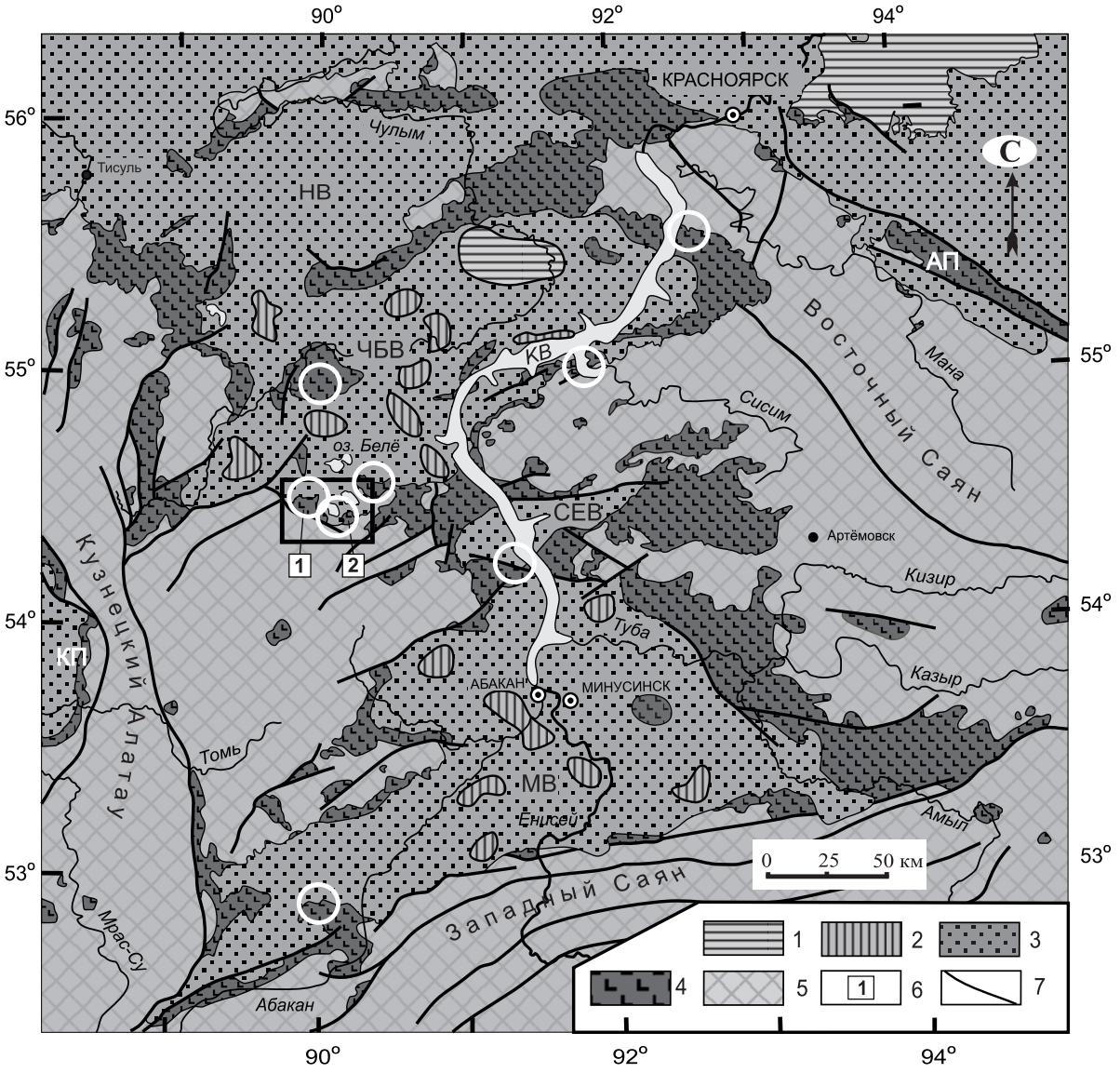


Рис. 1. *Положение участков с установленными силлами в Минусинском прогибе. 1,2) мульды и брахисинклинали, выполненные мезозойскими и позднепалеозойскими отложениями: 1) триасовыми и юрскими, 2) каменноугольными и пермскими; 3–4) девонские комплексы: 3) осадочный (D_{2gv}–D_{3fm}); 4) осадочно-вулканогенный (D_1–D_{2ef}); 5) выходы нижнепалеозойско-протерозойского фундамента на дневную поверхность; 6) участки изучения девонских магматических ассоциаций (1 – Ширинско-Марченгашский, 2 – Шунет-Матаракский); 7) разломы. Впадины Минусинского прогиба: НВ – Назаровская, ЧБВ – Чебаково-Балахтинская, СЕВ – Сыдо-Ербинская, МВ – Минусинская. Прогибы: КП – Кузнецкий, АП – Агульский. КВ – Красноярское водохранилище. Прямоугольником обозначена территория с учебными полигонами вузов Сибири, белыми окружностями – участки с базитовыми силлами*

велитов и конгломератов. По всему разрезу свиты, несогласно перекрывающейся (за пределами участка) мергелями сарагашской свиты, закартированы многочисленные мелкие силлы и штоки долеритов (рис. 2, *б*).

В геологическом строении Шунет-Матаракского участка принимают участие отложения (снизу вверх) имирской, матаракской, шунетской и арамчакской свит или толщ, составляющих быскарскую серию, несогласно залегающую на сложнодислоцированных кембрийских известняках (рис. 3).

К имирской свите (стратотип находится в районе г. Большой Имир) нами отнесены литокластические туфы кисло-среднего состава, среди которых располагаются потоки трахириодацитов и трахиандезитов, а также маломощные силлы крупнопорфировых долеритов. Такие силлы закартированы на южном склоне г. Плоской, в районе Родничка и в основании склона г. Поклонной. Разрез красноцветной матаракской свиты начинается с валунных туфоконгломератов и наращивается разнозернистыми терригенными отложениями, содержащими прослои туфов трахиандезитового и трахириодацитового состава. В средней части свиты имеется горизонт (12 м) диамиктитовых брекчий, позволяющий подразделять ее на две подсвиты.

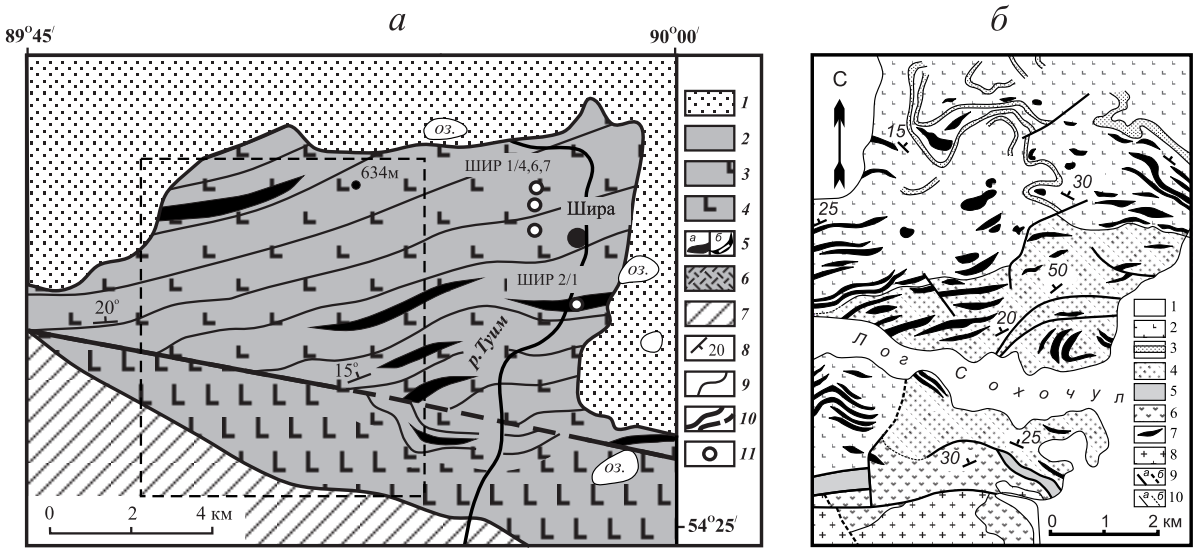


Рис. 2. *Схемы геологического строения Ширинско-Марченгашского участка (а) и размещения долеритовых силлов (б) (по [3], с упрощением). Для (а): 1) терригенные отложения (D_{2gv}–D_{3fm}); 2–5) отложения (D_1–D_{2ef}): 2) песчаники, алевролиты, гравелиты, 3) песчаники и конгломераты с редкими покровами базальтов, 4) базальты, андезибазальты, трахиты, трахидациты, их туфы и лавобрекчии, 5) силлы мелкозернистых (а) и крупнопорфировых (б) долеритов; 6) туфы и туфобрекчии имирской свиты; 7) додевонский фундамент (гранитоиды О, известняки Є); 8) элементы залегания; 9) геологические границы; 10) тектонические нарушения, 11) точки отбора проб. Прямоугольник – площадь детальной съемки геологами ТГУ и ТПУ. Для (б): 1) четвертичные отложения; 2,3) марченгашская свита: 2) базальты и андезибазальты, 3) красноцветные песчаники, гравелиты, конгломераты; 4,5) придорожная свита: 4) песчаники; 5) конгломераты; 6) вулканиты сохочульской толщи; 7) силлы и штоки долеритов; 8) гранитоиды уленьтуимского комплекса; 9,10) разрывные нарушения и геологические границы: а – прослеженные, б – условные (отсутствующие на оригинальной схеме в [3])*

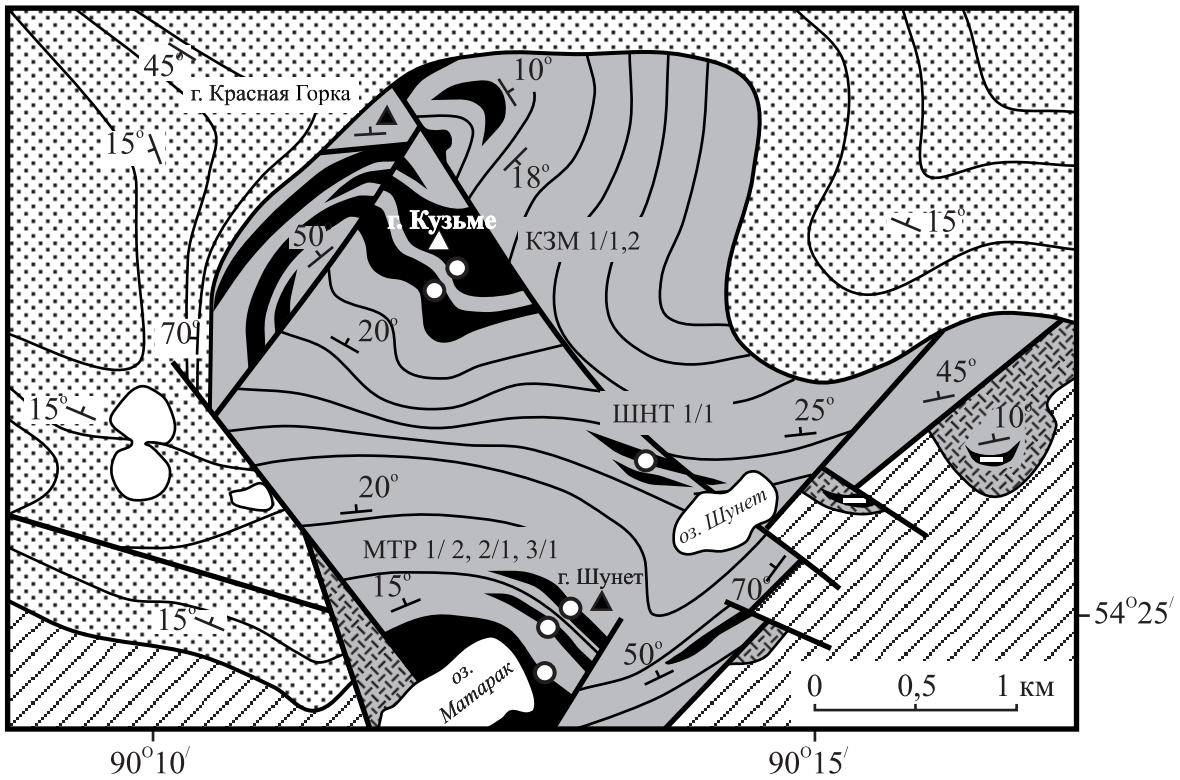


Рис. 3. *Схема геологического строения Шунет-Матаракского участка. Условные обозначения см. рис. 2, а*

Нижняя подсвита обильно насыщена многочисленными силлами мелкопорфировых и афировых долеритов кузьменского комплекса. Шунетская свита сложена зеленовато-серыми известковыми алевролитами с мелкощебенчатой отдельностью. Монотонность ее строения нарушена горизонтами песчаников (нижняя часть), мергелей (средняя часть) и пестроцветных алевролитов и песчаников (верхняя часть). Границы свиты являются условными и устанавливаются по смене окраски пород. В разных частях свиты картируется от двух до четырех долеритовых силлов кузьменского комплекса, верхние эндоконтактовые зоны которых сложены миндалекаменными разностями базальтов. Мощность зон достигает 2 м. Миндалины выполнены кальцитом, реже пренитом, иногда – керитом. Арамчакская свита представлена преимущественно красноцветными терригенными псефитами с незначительным участием вулканогенных пород. Отложения быскарской серии дислоцированы и эродированы, поражены несколькими разломами и перекрыты средне-верхнедевонскими отложениями сарагашской, бейской и ойдановской свит.

Таким образом, последовательность формирования нижнедевонских отложений на Ширинско-Марченгашском участке в целом аналогична Шунет-Матаракской, но резкая фациальная изменчивость пород затрудняет их корреляцию. Однако принципиально важным является то, что марчен-

Таблица 1. *Содержания петрогенных (мас. %), редких и редкоземельных элементов (г/т) в базитах Шира-Шунетского района*

Компоненты	Ширинско-Марченгашский участок				Шунет-Матаракский участок					
	ШИР 1/4	ШИР 1/6	ШИР 1/7	ШИР 2/1	КЗМ 1/1	КЗМ 1/2	ШНТ 1/1	МТР 1/2	МТР 2/1	МТР 3/1
SiO_2	47,21	46,63	48,50	46,55	47,46	47,24	48,75	46,62	46,85	47,59
TiO_2	1,62	1,96	1,66	1,62	1,49	1,51	1,30	1,31	1,20	1,44
Al_2O_3	15,82	16,57	17,96	15,27	15,67	15,95	16,40	16,07	15,84	15,53
$Fe_2O_{3\,об}$	10,56	12,05	10,38	10,90	10,19	10,65	9,70	11,57	10,89	10,70
MnO	0,16	0,18	0,15	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17
MgO	7,82	4,97	5,42	8,41	7,01	7,11	5,77	7,55	7,97	7,51
CaO	9,12	8,50	7,71	8,82	8,42	8,44	7,36	9,39	9,55	8,66
Na_2O	4,04	3,56	4,42	4,29	4,48	4,55	4,76	3,42	3,16	4,31
K_2O	1,15	1,80	1,08	0,84	0,95	1,29	1,44	0,89	0,89	1,18
P_2O_5	0,57	0,66	0,42	0,56	0,62	0,62	0,66	0,44	0,45	0,51
n.n.n.	2,04	3,14	2,27	2,77	3,22	2,48	3,79	2,63	3,01	2,33
Сумма	100,28	100,33	100,12	100,31	99,84	100,17	100,29	100,20	100,14	100,10
Rb	18,0	22,6	15,4	10,0	7,6	24,1	21,3	10,6	17,3	20,3
Ba	530	1458	1055	284	1869	519	780	368	414	621
Sr	1011	1578	779	594	992	863	1074	772	1100	972
Zr	295	301	216	217	250	195	307	162	168	177
Nb	17,8	17,8	9,6	11,3	15,8	14,9	21,2	10,4	11,5	10,6
Hf	5,5	5,9	4,3	4,2	4,6	4,4	5,8	3,4	3,5	3,8
Ta	1,1	1,2	0,7	0,8	0,9	0,7	1,3	0,8	0,6	0,6
Y	29,4	34,0	23,3	23,1	28,1	30,0	28,9	22,9	26,3	28,4
Th	3,0	2,7	2,9	1,9	2,9	2,9	4,1	3,1	2,8	1,8
U	1,38	0,99	1,20	0,90	1,42	1,26	1,75	1,02	1,07	1,05
La	37,86	40,90	25,81	25,89	37,36	39,85	55,20	30,91	30,27	29,06
Ce	84,7	91,3	57,1	59,4	83,4	78,5	112,7	65,0	73,0	67,6
Pr	9,7	11,0	7,1	7,4	9,6	9,6	12,4	8,1	7,5	7,5
Nd	42,0	48,4	31,7	32,3	40,9	38,7	51,3	34,9	30,4	32,5
Sm	8,09	9,52	6,54	6,60	8,00	7,34	9,15	6,64	6,19	6,51
Eu	2,42	2,81	2,05	2,02	2,30	2,13	2,43	1,89	2,13	2,27
Gd	7,92	8,78	6,14	6,24	7,59	7,32	8,27	5,98	5,57	6,26
Tb	1,09	1,26	0,86	0,88	1,03	0,94	1,07	0,83	0,70	0,83
Dy	6,47	7,58	5,22	5,22	6,15	5,29	6,44	5,35	4,77	5,02
Ho	1,26	1,48	1,04	1,04	1,23	1,18	1,24	1,07	0,84	0,96
Er	3,90	4,58	3,02	3,15	3,49	3,07	3,56	2,97	2,59	2,74
Tm	0,51	0,59	0,42	0,39	0,49	0,45	0,50	0,42	0,38	0,41
Yb	3,30	3,69	2,63	2,50	3,17	2,79	3,34	2,60	2,61	2,69
Lu	0,51	0,58	0,41	0,39	0,50	0,41	0,51	0,40	0,36	0,42

Примечание: Петрогенные элементы определены рентгено-флуоресцентным методом в ИГХ СО РАН, микроэлементы – методом ICP-MS в Аналитическом центре коллективного пользования ИНЦ СО РАН (пробоподготовка: сплавление с метаборатом лития). $Fe_2O_{3об}$ представляет суммарное железо. ШИР 1/4, 6 и 7 – покровные базальты марченгашской свиты; долериты кузьменского комплекса: ШИР 2/1 – силл Переездный, КЗМ 1/1 и 1/2 – Кузьменский силл, ШНТ 1/1 – Шунетский силл, МТР 1/2, 2/1 и 3/1 – Матаракские силлы 1,2 и 3.

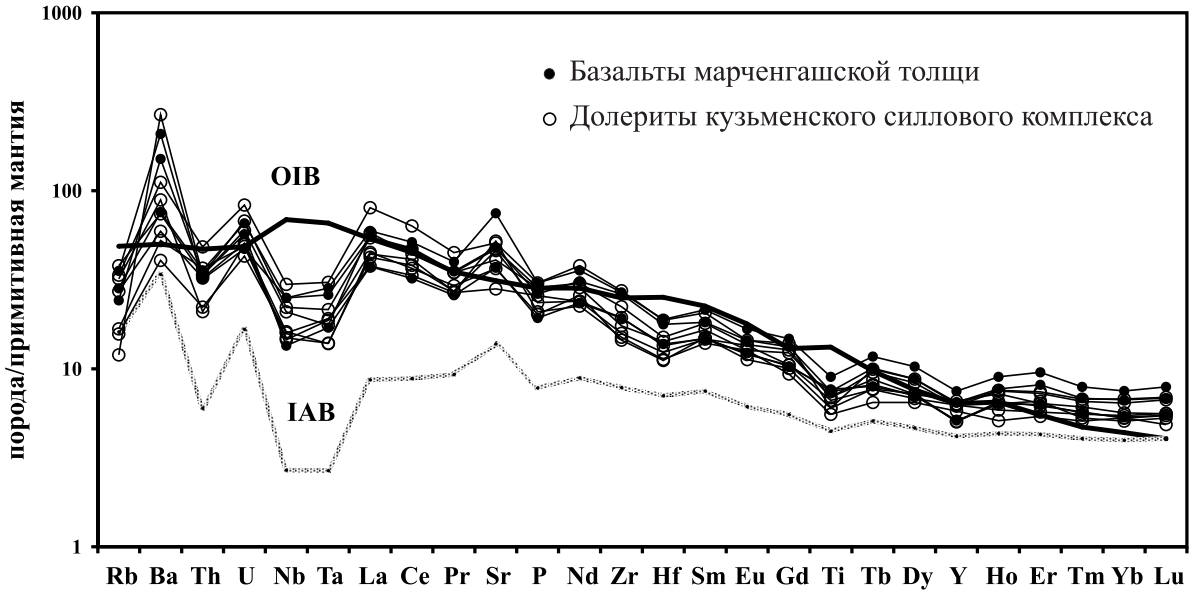


Рис. 4. *График распределения редких и редкоземельных элементов в породах Шира-Шунетского района. Нормировано по [6], OIB по [6], IAB по [5]*

гашская и шунетская свиты в максимальной степени насыщены долеритовыми силами, но различаются по составу матрицы, в которой размещаются силлы. В первом случае такой матрицей являются эффузивные базиты, содержащие красноцветные песчаники и со скрытым несогласием залегающие на отложениях придорожной свиты, а во втором – зеленоцветные известковые алевролиты, согласно залегающие с матаракскими породами. По обилию силлов марченгашская свита резко превосходит шунетскую, в которой нами не встречено долеритовых даек и штоков. Следует отметить, что на обоих участках развиты одинаковые породы базитового ряда – субщелочные базальты, андезибазальты, мелкозернистые и крупнопорфировые долериты.

Субщелочные базальты обладают порфировой и афировой структурами. Вкрапленники в них представлены оливином, слаботитанистым авгитом и плагиоклазом (An_{50-70}). Основная масса характеризуется гиалопилитовой, реже витрофировой структурой и сложена девитрифицированным стеклом, в котором различимы мелкие зерна клинопироксена, плагиоклаза, магнетита и апатита. Породы, как правило, изменены. Плагиоклаз соссюритизирован, авгит замещен хлоритом, по оливину развиты серпентин, тальк, хлорит и вторичный магнетит. В субщелочных долеритах присутствуют те же породообразующие и акцессорные минералы, что и в базальтах, но в сочетании с единичными чешуйками бледноокрашенного биотита.

Мелкозернистые разности обладают долеритовой структурой, в эндоконтактовых зонах силлов развиты стекловатые и миндалекаменные разности базальтов. Крупнопорфировые долериты характеризуются порфировидной структурой, их отличительной особенностью является наличие (от 15 до 50 об. %) лабрадоровых табличек размером от 1 до 4 см по длинной стороне. Светло-серый лабрадор контрастирует с буровато-черной основной массой и часто формирует трахитоидную текстуру, что позволяет безошибочно определять эти породы визуально в полевых условиях. Для долеритов эндоконтактовых зон характерны миндалины, выполненные одним или несколькими из следующих минералов: кальцитом, цеолитами, халцедоном, хлоритом и пренитом.

По химическому и редкоземельно-элементному составу все рассматриваемые породы достаточно близки (рис. 4). Анализ таблицы 1 показывает, что они принадлежат умереннотитанистой (TiO_2 от 1,20 до 1,96 мас. %) субщелочной калиево-натриевой ($4>Na_2O/K_2O>1$) серии. Обращает на себя отсутствие значимых различий между покровными базальтами и долеритовыми силлами по уровню содержаний всех петрогенных элементов.

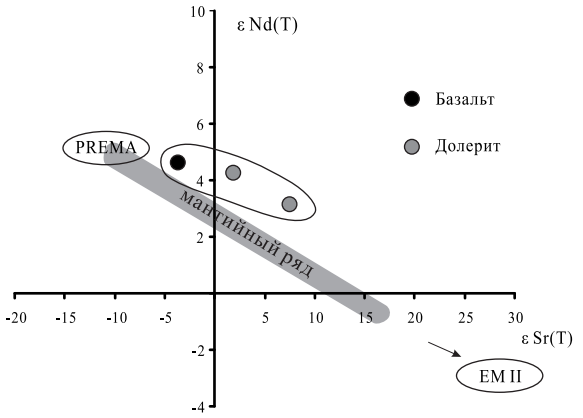


Рис. 5. *Изотопный состав стронция и неодима в базальтах и долеритах Шира-Шунетского района на диаграмме εSr(T) – εNd(T), где T=390 млн л*

Породы разных фаций глубинности проявляют удивительное сходство по концентрациям редких литофильных элементов. Они, также как и базальты Копьевского и Новоселовского поднятий Чебаково-Балахтинской впадины [4], близки по составу к внутриплитовым субщелочным базальтам типа OIB (рис. 4). В то же время, по сравнению с OIB они обеднены высокозарядными некогерентными элементами Nb, Ta, Zr, Hf, Ti и обогащены Ba, Sr и тяжелыми редкими землями. Подобные характеристики типичны для магматических серий активных континентальных окраин и островных дуг [5].

Таблица 2. *Изотопный состав Sr и Nd в базитах Шира-Шунетского района*

Параметр	Базальт	Долериты	
	ШИР 1/4	КЗМ 1/1	ШНТ 1/1
$^{87}Sr/^{86}Sr \pm 2\sigma$	0,704389±11	0,704783±16	0,705174±16
ε Sr(390)	−3,7	1,9	7,5
$^{143}Nd/^{144}Nd \pm 2\sigma$	0,512669±8	0,512655±9	0,512571±6
ε Nd(390)	4,6	4,3	3,1

Изотопные параметры базитов, характеризующие состав магматических источников, представлены в таблице 2 и на графике $\varepsilon Sr(T) - \varepsilon Nd(T)$ (рис. 5). Точки составов базальта и долеритов группируются в линейно вытянутый тренд, отклоняющийся от мантийного ряда океанических пород. Подобное отклонение свидетельствует о том, что при формировании базитовых расплавов, происходило смешение источников с характеристиками горячих точек мантии типа PREMA, а также других источников с параметрами субстратов, обогащенных радиогенным стронцием. Такими субстратами могли быть как контаминированный литосферный материал (обогащен РЗЭ), так и карбонатный материал (обеднен РЗЭ), вовлеченный в надсубдукционную область магмообразования при доживесткой субдукции на юго-западной активной континентальной окраине Сибирского континента [7].

Выводы

Девонские вулканогенно-осадочные разрезы Шира-Шунетского района насыщены базитами: базальтами (покровы) и долеритами (силлы). Ширинско-Марченгашский и Шунет-Матаркский участки этого района различаются долей осадочной компоненты и характеризуются резкой фациальной изменчивостью пород. Базиты этих участков обладают близкими возрастными и вещественными параметрами, поэтому их следует относить к производным общего магматического источника. При его образовании происходило смешение расплавов, формирующихся одновременно над горячими точками мантии и в надсубдукционных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-05-0055.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучицкий И.В. Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского межгорного прогиба. – М.: Изд-во АН СССР. 1960. – 276 с.
2. Федосеев Г.С. О масштабах базитового силлогенеза в северной части Алтае-Саянской складчатой области // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Матер. II научн. конф. – Томск, 2001. – В. 2. – С. 181–186.
3. Геология и полезные ископаемые Северной Хакасии (Путеводитель по учебному геологическому полигону вузов Сибири) // под ред. В.П. Парначева. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1998. – 172 с.
4. Воронцов А.А., Федосеев Г.С. Геохимические и Sr-Nd изотопные характеристики девонских базитов Копьевского и Новоселовского поднятий северной части Минусинского прогиба // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 92–97.
5. Гриб Е. Н., Леонов В.Л., Перепелов А.Б. Геохимия вулканических пород Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 6. – С. 3–25.
6. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Publ. – 1989. – № 42. – P. 313–345.
7. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Федосеев Г.С., Никифоров А.В., Сандимирова Г.П. Изотопно-геохимическая зональность магматизма девонской Алтае-Саянской рифтовой области: к оценке состава и геодинамической природы мантийных магматических источников // Петрология. – 2010. – Т. 18. – № 6. – С. 45–58.

Поступила 29.03.2011 г.

УДК 553.984;552.54

КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ ДОЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ

А.Е. Ковешников[1,2], Н.М. Недоливко[1]

[1]Томский политехнический университет
[2]ТФ Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Томск
E-mail: Kovesha@mail.ru

Доюрские (вендские, палеозойские) отложения юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы прошли преобразования последовательно: диагенез и первичный катагенез во время и сразу после окаменения; орогенный этап развития и формирования кор выветривания в перми-триасе; вторично-катагенетические преобразования, начиная с юрского периода. Коры выветривания развиты по всей площади выхода на доюрскую поверхность палеозойских пород в виде маломощной приповерхностной зоны улучшенных коллекторских свойств, в виде кремнисто-глинистых щебнистых масс по отложениям аналогичного состава, а по измененным эффузивам основного состава и туфам развиты бокситы, в том числе переотложенные. В образованиях коры выветривания сформированы коллекторы, совокупность которых именуется нефтегазоносный горизонт зоны контакта. Геометрия сформированных ловушек нефти и газа имеет линейно-вытянутую плащеобразную форму.

Ключевые слова:
Коры выветривания, доюрские отложения, Западно-Сибирская геосинеклиза.

Key words:
Weathering crust, prejurassic rocks, Western-Siberian geosineclise.

В Западной Сибири в настоящее время добыча нефти и газа осуществляется, в основном, из верхнеюрских и нижнемеловых песчано-алевритовых отложений. Доюрские отложения, в пределах которых открыт ряд мелких месторождений нефти и газа, еще не достаточно полно оценены. Они сосредоточены в зоне коры выветривания, развитой по поверхности палеозойских отложений, которая получила в литературе наименование горизонта НГГЗК (нефтегазоносный горизонт зоны контакта) палеозойских и мезозойских отложений [1]. Установление особенностей формирования горизонта НГГЗК сводится к рассмотрению вопроса о составе пород, слагающих палеозойский комплекс, и их преобразованиям в зоне проявления гипергенных процессов в период континентального стояния региона. Это коры выветривания, в том числе и переотложенные.

Доюркие отложения с момента формирования и до настоящего времени, претерпели ряд преобразований вторичными процессами, которые можно разделить на три крупных периода, характеризующихся своими особенностями, влияющими, в конечном итоге на формирование пород-коллекторов по всем доюрским отложениям.

Три глобальных этапа преобразования доюрских отложений

Доюрские отложения на территории Западно-Сибирской геосинеклизы прошли длительный период преобразования вторичными процессами. Их можно разделить на три временных периода, каждый из которых требует отдельного рассмотрения.

Первый включает диагенез и первично-катагенетические преобразования, которые породы претерпели сразу после окаменения до момента завершения орогенного этапа развития региона, осуществившегося в конце карбона-начале перми. Отложения вендско-среднекарбонового возраста прошли сначала стадию диагенеза, затем первичного катагенеза. Доюрские отложения в конце этого периода были смяты в складки, претерпели период активизации блоковой тектоники, окончание которого знаменуется началом формирования кор выветривания.

Второй – формирование кор выветривания по выходам палеозойских отложений на доюрскую поверхность, которые осуществились в пермский и триасовый периоды во время континентального стояния региона [2]. В результате был значительно сглажен рельеф и сформировался горизонт НГГЗК, представленный кремнисто-глинистыми щебнистыми массами – корами выветривания по кремнисто-глинистым отложениям, залегающим *in situ* или переотложенным (рис. 1), а также представленный зонами разуплотнения, развитыми по доюрским отложениям кремнисто-глинистого состава. Реже развиты плащеобразно залегающие тела бокситов, частично переотложенных. Заканчивается период формированием речных долин при начале формирования юрского моря. Коры выветривания перекрываются терригенными отложениями юрско-палеогенового моря (тюменская свита).

Третий – доюрские породы, в результате перекрытия их более чем полуторакилометровой толщей морских отложений юрско-палеогенового возраста, прошли катагенетические преобразования, первичные для юрско-меловых и палеогеновых пород, и вторично-катагенетические для доюрских отложений [3, 4]. Вторичные преобразования, проявляющиеся преимущественно по чистым известнякам, ведут к формированию в них резервуаров и ловушек нефти и газа метасоматически-трещинных и трещинных типов [3, 4].

Нами достаточно детально изучены вендские и палеозойские отложения юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы. Это Чкаловская площадь [5, 6] и ряд площадей Нюрольского

структурно-фациального района [2], который в настоящее время предложено именовать Чузикско-Чижапской зоной нефтегазонакопления [1].



Рис. 1. *Конгломерато-брекчия кремнисто-глинистых пород (светлое), сцементированная глинистым материалом. Породы смещены вниз по склону*

Из этих трех охарактеризованных периодов в настоящей статье рассмотрены особенности проявлений первого и второго, а именно первично-катагенетических преобразований пород и формирования кор выветривания горизонта НГГЗК.

Литология и краткая история формирования доюрских отложений

Вендские отложения представлены доломитовыми породами с прослоями псефитолитов и с телами измененных эффузивов. Палеозойские отложения сложены доломитизированными известняками ордовикско-раннекарбонового возраста, относимыми к образованиям аккумулятивного комплекса, кремнисто-глинистыми образованиями бассейнового комплекса верхнего девона [2], сформированными по бассейновым образованиям корами выветривания глинисто-кремнистого состава, и бокситами, развитыми по измененным эффузам основного состава и туфам. Палеозойские отложения до настоящего времени подразделены на ряд свит и толщ [7].

Для изучения особенностей вторичных преобразований пород и формирования в них пород-коллекторов, по нашему мнению, целесообразно рассматривать эти отложения по принципу перспективности (или отсутствия таковой) для формирования в них пород-коллекторов. Предлагается объединять изученные отложения в литологические подразделения на основе общности их литологического состава и петрофизических свойств, именуя их **литолого-петрографическими толщами** (таблица), для которых нами предлагается следующее определение: «Литолого-петрографическая толща – комплекс осадочных или вторично-преобразованных пород любого генезиса, в которых, либо ввиду особенностей их накопления, либо ввиду вторичных преобразований, сформировались или могут быть сформированы породы-коллекторы. Литолого-петрографические толщи могут состоять из отложений одной подсвиты, свиты или из нескольких свит, если их условия формирования и, соответственно, петрофизические параметры, схожи». Подобное подразделение удобно при изучении отложений, имеющих общий комплекс вторичных преобразований и близкие значения коллекторских свойств.

При накоплении ордовикско-среднекарбоновых отложений с конца силура до конца нижнего карбона проявлялась дифференциация дна бассейна с формированием двух типов разреза: рифогенно-аккумулятивного и бассейнового. До и после этого временного интервала характерен единый комплекс отложений. В середине среднего карбона осадконакопление прекратилось (таблица).

В плане рассмотрения формирования коллекторских свойств пород из приведенных в таблице, можно выделить три группы: 1) коры выветривания по кремнисто-карбонатным и кремнисто-глинистым образованиям с формированием как профиля коры выветривания, так и переотложенных щебнистых кремнисто-глинистых масс; 2) бокситы по эффузивам основного состава и туфам, в том числе переотложенные; 3) гидротермально-метасоматические доломиты замещения по известнякам, лишенными примеси терригенного материала. Первые две подгруппы относятся к горизонту НГГЗК (коры выветривания) и рассматриваются в настоящей статье. Третья подгруппа рассмотрена более подробно в статье [8].

Породы палеозойского комплекса, по которым сформированы коры выветривания, претерпели два периода преобразований из названных выше, а именно диагенез и первично-катагенетические преобразования и гипергенез в период континентального стояния региона.

Диагенез и первично-катагенетические преобразования пород

Петрофизические особенности карбонатных пород при их формировании, согласно Ю.И. Марьенко [9], после седиментации подразделяются на две группы: нормально-осадочные карбонатные илы, в которых пустоты не формируются, и породы, которые литифицируются сразу после образования (именуются стереофитическими образованиями, к ним относятся рифовые постройки). Все карбонатные отложения на изученной территории представлены нормально-осадочными илами с редкими стереофитическими телами – биогермами и биостромами, ообенно в толще известняков с биогермами и биостромами среднего девона. Таким образом, при осадконакоплении в изученных карбонатных образованиях коллекторские свойства почти не формируются.

Диагенез и первичный катагенез заключаются в следующем. Породы доломито-известняковой литолого-петрографической толщи (известняки

Таблица. *Доюрские отложения Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления*

Литолого-петрографические толщи		Стратиграфическое подразделение	
Тип седиментации		Тип седиментации	
Рифогенно-аккумулятивный	Бассейновый	Рифогенно-аккумулятивный	Бассейновый
Кембрийско-ордовикский осадочный комплекс			
1. Терригенная (ϵ_2-ϵ_3)-(O_2k-O_3aŠ)		Жигаловская толща (ϵ_2-ϵ_3) Павловская толща (O_2k-O_3)	
Силурийско-раннедевонский осадочный комплекс			
2. Доломито-известняковая (S_{1-2}-D_1l)	3. Глинисто-карбонатная ритмически построенная (S_1-Д$_1$e)	Ларинская свита (S_1)	
		Межовская свита (S_2)	3. Майзасская свита (S_{1-2}p)
		Кыштовская свита (D_1l)	Лесная свита (D_1l)
4. Глинисто-карбонатная псефитолитовая (D_1p-e)		4. Армичевская свита (D_1p)	Лесная свита (D_1l-p)
		Солоновская свита ($D_1e^н$) Надеждинская свита ($D_1e^в$)	Мирная толща (D_1e)
После частичного перерыва средне-позднедевонский осадочный комплекс			
8. Известняков с биогермами и биостромами (D_1^2-D_3^1)	5. Известняково-глинисто-гравелитовая (D_2ef-žv)	Нижняя (D_2ef), средняя (D_2žv^1) подсвиты Герасимовской (D_2) свиты	Нижняя подсвита чузикской свиты (D_2ef-žv^1)
	6. Карбонатно-глинистая битуминозная. (D_2žv^2)	Верхняя (D_2žv^2) подсвита Герасимовской свиты	Верхняя подсвита чузикской свиты (D_2žv^2)
9. Карбонатная (D_3)	7. Кремнеаргиллитовая с радиоляритами (D_3f-fm)	Нижняя (D_3f^1) и верхняя (D_3f^2-fm) подсвиты Лугинецкой (D_3) свиты	Нижняя (D_3f-fm^1) и верхняя (D_3fm^2) подсвиты чагинской свиты
После частичного перерыва ранне-среднекарбоновый осадочный комплекс			
11. Известняков окварцованных со спонголитами (C_1t-s$_1$)	10. Туфогенно-глинистая с прослоями известняков (C_1t –s^1)	Табаганская свита (C_1t-s$_1$)	Кехорегская свита (C_1t-s^1)
Исчезновение признаков дифференциации дна бассейна			
12.Терригенная с прослоями туфов (C_1s^1-C_2b^1)		Средневасюганская свита (C_1s-C_2b$_1$); Елизаровская свита (C_2b$_2$)	
Перерыв в осадконакоплении, орогенез и размыв палеозойских отложений **формирование горизонта НГГЗК**			
Туфогенно-обломочная толща. Конгломерато-брекчии глинисто-кремнистых пород Калиновой свиты (P-T), бокситы (P-T)			

доломитизированные) в стадию диагенеза были подвержены процессам грануляции, спаритизации цемента и заполнения пустот. Цемент был в значительной степени доломитизирован, скелетные остатки сохранили кальцитовый состав. Остаточный кальцит группируется в агрегаты, по которым может быть сформировано пустотное пространство.

В карбонатных отложениях литолого-петрографической толщи известняков с биогермами и биостромами среднедевонского возраста (известняки амфипоровые, строматопоровые, диагенетически доломитизированные), слагающие породы организмы могут формировать биогермы и биостромы с определенным пустотным резервом. Диагенетическая доломитизация проявляется в замещении доломитом цементирующей массы и в развитии зерен доломита в составе органических остатков.

Отложения карбонатной толщи позднедевонского возраста (известняки строматопоровые и водорослевые) в стадию диагенеза преобразованы процессами спаритизации. Проявлений диагенетической доломитизации не установлено.

Отложения бассейнового комплекса – кремнеаргиллитовая с радиоляритами толща верхнедевонского возраста (кремнеаргиллиты с прослоями радиоляритов и известняков) в стадию диагенеза подверглись воздействиям процессов диагенетического окремнения и диагенетической кальцитизации и сидеритизации, в результате проявлений которых происходило перераспределение части биогенного материала (кальцита и кварца). При выщелачивании биогенного кварца и биогенного кальцита формируются пустоты на месте ранее существовавшего планктона, заключенные в кремнисто-глинистую массу цемента.

Карбонатные породы литолого-петрографической толщи известняков окварцованных раннекарбонового возраста представлены известняками зоогенными биоморфно-детритовыми, микрокварцитами, спонголитами, аргиллитами, туфоаргиллитами. Диагенетическое окварцевание привело к замещению карбонатных частиц цемента и скелетных остатков организмов, что заложило в образованиях толщи значительный пустотный потенциал. При выщелачивании в зоне коры выветривания формируется плотный каркас породы с порами и каверна-ми, развитыми на месте существовавшего ранее биогенного кальцита и биогенного кварца.

Образования толщи туфогенно-глинистой с прослоями известняков раннекарбонового возраста сложены аргиллизированными туфами с примесью остатков спикул губок и радиолярий, выполненных кварцем. Встречены прослои туфогенных обломочных пород и известняков. Основные вторичные процессы – выщелачивание (карбонатные минералы и биогенный кварц выносятся). Часть образующихся пор заполняется вторичными минералами, такими как каолинит и сидерит.

Коры выветривания по палеозойским образованиям

Собственно коры выветривания, развитые по доюрским отложениям юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы, представлены в той или иной степени измененными палеозойскими образованиями, выходящими на доюрскую поверхность, которые в период континентального стояния региона претерпели воздействие агентов поверхностного выщелачивания зоны гипергенеза. Сформировалась узкая (за некоторыми исключениями) зона с повышенной пористостью и проницаемостью пород палеозоя и образования переотложенной коры выветривания трех типов: по кремнисто-глинистым образованиям, по карбонатным породам, по измененным эффузивам основного состава и их туфам.

Кремнисто-глинистые породы входят в состав толщ: кремнеаргиллитовой с радиоляритами, известняков окварцованных со спонголитами, туфогенно-глинистой с прослоями известняков. По данным отложениям коры выветривания могут простираться в глубину до первых сотен метров. Из них выносится весь биогенный кварц (радиолярии, спикулы губок) и весь биогенный кальцит (раковины планктона), и порода представляет собой агрегат кремнисто-глинистого состава с мелкими порами, сформированными на месте существовавших ранее раковин мелкого планктона.

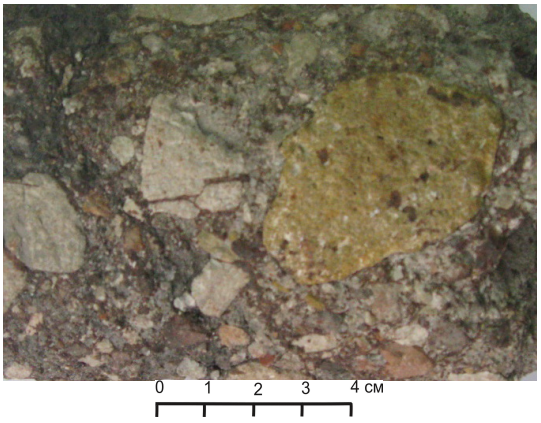


Рис. 2. *Конгломерато-брекчия глинистых и кренисто-глинистых пород, сцементированных глинистым с примесью гидроокислов железа цементом. Скв. Южно-Тамбаевская 76*

В период континентального стояния региона данные отложения ввиду устойчивости к физическому выветриванию занимали повышенное положение в рельефе, и по всей их поверхности формировались щебнистые массы (рис. 2). В начале юрского периода эти щебнистые массы стали разноситься водными потоками в пониженные участки рельефа, в конечном итоге перекрыв плащеобразным покровом значительную часть изученной территории.

Комплекс переотложенных кор выветривания, развитых в описываемом районе, получил в литературе наименование «Калиновая свита» [11]. Это брекчии и конгломерато-брекчии, сложенные обломками выветрелых спонголитов, радиоляритов, кремнеаргиллитов, аргиллитов, измененных эффузивов, обломков жильного кварца, сцементированными глинистой с примесью обломочного материала массой (рис. 2). Они могут переходить в аргиллиты, обогащенные в той или иной мере обломками вышеназванных пород и содержать прослои аргиллитов, каолинизированных и сидеритизированных (рис. 3). В отдельных случаях такие образования могут являться породами-коллекторами.

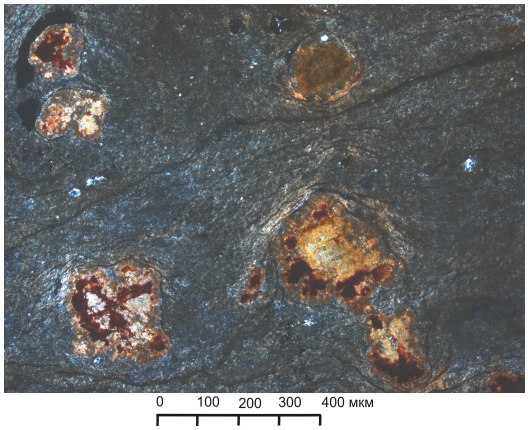


Рис. 3. *Сферолиты сидерита с примесью гидроокислов железа в кремнисто-глинистом каолинизированном цементе аргиллита коры выветривания. Скв. Герасимовская 1*

Вторая группа пород – карбонатные отложения. При формировании коры выветривания они обычно нацело растворяются, участками с формированием плащеобразной массы мелкообломочных карбонатных пород на их поверхности, или перекрыты переотложенной корой выветривания кремнисто-глинистых пород. Изучая их, мы можем видеть только зону физического и слабого химического выветривания, проявившуюся в трещинообразовании и незначительном увеличении пористости в приповерхностной зоне.

Бокситы и их генезис

Данные породы по скважине Урманская 10 (интервал 3089,5...3070,4 м) представлены пизолитовыми бокситами каменистыми или землистыми желто-буро-коричневыми, с прослоями, обогащенными крупными обломками известняков (до 10 см) или известняковой дресвой, с брекчиями, микрослойками зеленоватых глин, и с серыми аргиллитоподобными глинами в кровле (с остатками растительного детрита). Они залегают на фораминиферо-водорослевых известняках средне-верхнего девона, и перекрыты угленосными отложениями нижней-средней юры. Встречены брекчии сложного состава и аргиллиты, выполненные каолинитом с очень мелкими зернами сферосидерита.

Бокситы, предположительно, образовались по туфам и эффузивам основного состава, по которым сформирована латеритная кора выветривания.

После образования они претерпели частичное переотложение, смещались по склону и отлагались здесь же и во впадинах.

Как по собственно корам выветривания, сформированным *in situ*, так и по переотложенным корам выветривания и бокситам, часто сформированы ловушки нефти и газа пластового, пластово-массивного и массивного типов, аналогичные таковым для юрских и меловых песчаников, так как коры выветривания и бокситы сформированы во многом аналогично осадочным обломочным породам.

Выводы

1. По доюрским образованиям юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы в орогенный этап развития региона сформировались коры выветривания в виде субгоризонтально залегающих линейных приповерхностных участков. По известнякам это узкие зоны незначительно повышенных коллекторских свойств, по кремнисто-карбонатным и кремнисто-глинистым породам их мощность достигает первых десятков метров. Выходы на доюрскую поверхность эффузивов основного состава и их туфов преобразованы в бокситы.
2. В зонах выхода на доюрскую поверхность кремнисто-карбонатных и кремнисто-глинистых отложений сформированы переотложенные коры выветривания, представленные щебнистой массой кремнисто-глинистого состава, они частично смещены, и перекрывают плащеобразными массами находящиеся поблизости породы.
3. В корах выветривания, в том числе и в переотложенных, могут формироваться залежи нефти и газа пластового, массивного и пластово-массивного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович В.А. Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений Западной Сибири (на примере Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления) // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 538–547.
2. Конторович А.Э., Иванов И.А., Ковешников А.Е. и др. Геологические условия нефтегазоносности верхней части палеозойского разреза Западной Сибири (на примере Межовского срединного массива) // В кн.: Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа / под ред. И.С. Грамберга и др. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 152–171.
3. Ковешников А.Е. Резервуары нефти и газа в доюрских образованиях Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 147–151.
4. Ковешников А.Е. Ловушки нефти и газа в доюрских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 152–155.
5. Терлеев А.А., Токарев Д.А., Ковешников А.Е., Макаренко С.Н. Новые биостратиграфические данные по осадочным образованиям «домезозойского» фундамента Западно-Сибирской геосинеклизы в северо-западной части Томской области (материалы параметрической скважины Чкаловская-501) // Фундамент структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности: Труды II Всеросс. научной конф. с участием иностранных ученых. – 27–29 апр. 2010. – Тюмень: ОИТ НГГ СО РАН, 2010. – С. 103–106.
6. Terleev A.A., Tokarev D.A., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Koveshnikov A.E., Sennikov N.V., Tatianin G.M. New paleontologycal data from the Upper Vendian of the Chkalovskoe Territory of the Fore-Yenisei sediment of the West Siberian Megabasin (boreholes 10, 17, 26, 501) // Neoproterozoic Sedimentary Basins Stratigraphy, Geodynamics and Petroleum Potential: Труды Междунар. конф. – 30 июля – 02 августа 2011, Новосибирск. – Novosibirsk: IPGG SB RAS, 2011. – P. 100–102.
7. Решение Межведомственного совещания по рассмотрению и принятию Региональной стратиграфической схеме палеозойских образований Западно-Сибирской равнины // под ред. В.И. Краснова. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1999. – 180 с.
8. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Вторично-катагенетические преобразования доюрских пород Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 82–86.
9. Марьенко Ю.И. Нефтегазоносность карбонатных пород. – М.: Недра, 1978. – 239 с.
10. Ковешников А.Е. Изменение факторов среды при формировании отложений тартасской серии девона Нюрольского структурно-фациального района Западно-Сибирской равнины // Эволюция жизни на Земле: Труды IV Междунар. симпоз. – Томск, 10–12 ноября 2010. – Томск, 2010. – С. 93–96.
11. Тищенко Г.И. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности зоны контакта доюрского фундамента и осадочного чехла юго-восточной части Западно-Сибирской плиты (Томская область): автореф. дис. ... канд. геол-минерал. наук. – Новосибирск, 1978. – 25 с.

Поступила 30.09.2011 г.

УДК 553.984;552.54;551.253

ВТОРИЧНО-КАТАГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДОЮРСКИХ ПОРОД ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ

А.Е. Ковешников[1,2], Н.М. Недоливко[1]

[1]Томский политехнический университет
[2]ТФ Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Томск
E-mail: Kovesha@mail.ru

В результате проявления вторично-катагенетических преобразований доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы в палеозойских карбонатных породах сформировались породы-коллекторы трещинно-метасоматической природы. Ведущие гидротермальные процессы – доломитизация и вышелачивание известняков, каолинизация и сидеритизация кремнисто-карбонатных и кремнисто-глинистых пород. Развитие резервуаров и ловушек нефти газа гидротермально-метасоматической природы контролируется сеткой разломов северо-западного и северо-восточного простирания, при наложении которых на поля развития карбонатных пород формируются породы-коллекторы. Геометрия залежей зависит не от рельефа доюрской поверхности, а от направления разломов и степени проявления вторичных процессов. Они могут проявляться отдельно или составлять с залежами, приуроченными к корам выветривания, единый комплекс.

Ключевые слова:
Вторично-катагенетические преобразования, доюрские отложения, Западно-Сибирская геосинеклиза, метасоматоз, трещинообразование, разломы.

Key words:
Secondary catagenetic transformation, prejurassic adjournment, Western-Siberian geosineclise, metasomatism, formation of cracks, faults.

В настоящее время в Западной Сибири добыча нефти и газа осуществляется преимущественно из юрских и меловых песчано-алевритовых отложений. Поиск новых источников нефти и газа в последние годы все больше направляется на палеозойские отложения карбонатного, кремнисто-карбонатного и кремнисто-глинистого состава. Формирование в них пород-коллекторов происходит не в процессе осадконакопления, а в результате воздействия вторичных, гидротермально-метасоматических процессов, и, как следствие, такие отложения менее понятны относительно перспектив их нефтегазоносности в сравнении с юрско-меловыми отложениями, залежи в которых совпадают с песчано-алевритовыми телами определенного генезиса.

Нами, в последние годы, предложено подразделение вторичных процессов, ведущих к формированию пород-коллекторов в доюрских отложениях (венд и палеозой) юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы на три периода [1], включающие: диагенез и первичный катагенез (венд – карбон); формирование кор выветривания в период континентального стояния региона в пермский и триасовый периоды; вторично-катагенетические преобразования палеозойских пород после формирования юрско-палеогенового моря. Первые два процесса описаны в [1]. Зона их проявления именуется НГГЗК (нефтегазоносный горизонт зоны контакта палеозойских и юрских отложений). Третьему, а именно вторично-катагенетическим преобразованиям, и связанными с этим процессом особенностями формирования пород-коллекторов в палеозойских отложениях юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы в результате трещинно-метасоматических процессов, а значит, и с особой геометрией формирования залежей нефти и газа, и посвящена настоящая статья.

Доюрские отложения юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы

Нами достаточно детально изучены доюрские отложения юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы: вендские отложения северо-западной части Томской области (Чкаловская площадь) и ряд площадей Нюрольского структурно-фациального района (Межовского срединного массива), расположенного на территории Нюрольской впадины [2], которую в последние годы предложено именовать Чузикско-Чижапской зоной нефтегазонакопления [3].

Вендские отложения представлены доломитами с прослоями псефитолитов и аргиллитами, а палеозойские отложения (кембрий – средний карбон) представлены карбонатными, в том числе доломитизированными или окварцованными породами, кремнисто-глинистым отложениям верхнего девона и нижнего карбона [2, 4], корами выветривания глинисто-кремнистого состава, в том числе щебнистыми и переотложенными и бокситами, развитыми по измененным эффузивам основного состава и их туфам [1].

Палеозойский разрез подразделен нами на литолого-петрофизические толщи [1]: терригенную; доломито-известняковую (S_{1-2}-D_1l); глинисто-карбонатная ритмически построенную (S_1-$Д_1e$); глинисто-карбонатную псефитолитовую (D_1p-e); известняково-глинисто-гравелитовую (D_2ef-žv); карбонатно-глинистую битуминозную, ($D_2žv^2$); известняков с биогермами и биостромами (D_1^2-D_3^1); кремнеаргиллитовую с радиоляритами (D_3f-fm); карбонатную (D_3); туфогенно-глинистую с прослоями известняков (C_1t-s^1); известняков окварцованных со спонголитами (C_1t-s_1); терригенную с прослоями туфов (C_1s^1-C_2b^1);

В палеозойских отложениях выделяются зоны воздействия гипергенных процессов: маломощная зона микротрещиноватых и микропористых известняков в приповерхностной зоне выхода на доюрскую поверхность толщ (доломито-известняковой, известняков с биогермами и биостромами, карбонатной); мощная зона преобразования кремнисто-карбонатных и кремнисто-глинистых по составу пород толщ (кремнеаргиллитовой с радиоляритами, известняков окварцованных со спонголитами, туфогенно-глинистой с прослоями известняков). Толщи карбонатно-глинистого состава, как мало перспективные для формирования пород-коллекторов, в дальнейшем изложении, подробно не рассматриваются. По выходам на доюрскую поверхность кремнисто-карбонатных и кремнисто-глинистых пород сформированы переотложенные коры выветривания: кремнисто-глинистая обломочная толща (образования калиновой свиты, P-T); по эффузивам основного состава – бокситы.

Вторично-катагенетические преобразования

При начале формирования юрско-палеогенового моря палеозойские отложения, значительно преобразованные в зоне коры выветривания, переотложенные коры выветривания и бокситы вновь включились в процесс осадконакопления. Эти образования были частично размыты во время формирования отложений тюменской свиты юрского возраста, затем перекрыты морскими отложениями и вместе с юрским комплексом пород прошли, и продолжают проходить в настоящий момент, процесс катагенеза, который для палеозойских пород является вторично-катагенетическим.

Если переотложенные коры выветривания и бокситы в плане формирования в них пород-коллекторов аналогичны песчаным пластам мезозойского возраста, как по форме, так и по способу формирования пустотного пространства, то известняки от кембрия до раннего карбона и кремнисто-глинистые образования верхнедевонско-раннекаменноугольного возраста участками представлены как потенциально благоприятные зоны для формирования пород-коллекторов трещинного типа. Известняки представляют собой особые геологические тела, напоминающие по механическим свойствам пакеты стекла. Они были частично доломитизированы в стадию диагенеза и первичного катагенеза, что придало этим толщам некоторое отличие, реализуемое в дальнейшем при проявлении вторично-катагенетических процессов. Затем они были разбиты на блоки в орогенный этап развития региона, и по их выходу на доюрскую поверхность сформировались маломощные зоны пород с улучшенными коллекторскими свойствами.

Потом они были подвержены длительному процессу медленного смещения блоков. Это движение можно оценить при анализе отражающего горизонта IIa – подошвы баженовской свиты. Эти породы в момент отложения имели приблизительно горизонтальное расположение, затем, на этой поверхности, появились выпуклые и вогнутые участки, отражающие подъем или погружение расположенных ниже блоков палеозойского фундамента. По тектоническим швам, разделяющим блоки палеозойского фундамента, могли циркулировать гидротермальные растворы, вызывающие доломитизацию, окремнение, выщелачивание.

Далее блоки, сложенные известняками, в различной степени диагенетически доломитизированными, могли быть, как пачки стекла, расколоты разломами северо-западного и северо-восточного простирания, не сопровождающимися значительным смещением, но являющимися путями разгрузки тектонического напряжения. Такие разломы сопровождались оперяющими трещинами, затрагивающими значительный объем пород, прилегающих к тектоническому нарушению. В этих тангенциально ориентированных зонах трещиноватости проявились процессы гидротермального метасоматоза и гидротермального выщелачивания. Здесь, при наложении данных разломов на известняки, в той или иной степени доломитизированные (в стадию диагенеза и первичного катагенеза), происходило формирование пород-коллекторов того или иного типа, и были сформированы ловушки нефти и газа трещинно-метасоматического типа, описанные нами в [2]. При пересечении данными разломами массивов, сложенных кремнисто-глинистыми отложениями, значительно преобразованными в зоне проявления гипергенных процессов, формируются зоны воздействия процессов гидротермального выщелачивания, сопровождаемого осаждением каолинита и сидерита.

Таким образом, главный момент для формирования пород-коллекторов в палеозойских отложениях различного литологического состава наступает в стадию вторично-катагенетического преобразования этих отложений. По трещинам, как заложенным в орогенный этап развития региона и впоследствии подновленным при медленных вертикальных перемещениях блоков, так и по новым трещинам северо-восточного и северо-западного простирания [2] и по трещинам, их оперяющим, проявляются различные гидротермальные процессы, ведущие к формированию пород-коллекторов метасоматически-трещинного гидротермального типа.

Такие зоны трещиноватости могут развиваться как по участкам разреза, затронутого поверхностным выщелачиванием в период континентального стояния региона при формировании горизонта НГЗК, а могут и отстоять от доюрской поверхности, проявляясь в виде трещиноватых зон развития вторичных процессов, окруженных неизмененными породами.

Нами ранее [5] выделено три типа гидротермальных процессов, разделенных по времени и имеющих различную геохимическую специализацию. Это вторично-катагенетические: доломит-

изация; выщелачивание, сопровождающееся процессами каолинизации с сидеритизацией; выщелачивание, сопровождаемое развитием инкрустационного доломита.

Вторично-катагенетическая доломитизация

Развитие процесса гидротермальной доломитизации, ведущего к формированию пород-коллекторов, установлено в отложениях силурийско-девонского комплекса, в толщах: доломито-известняковой, известняков с биогермами и биостромами, карбонатной. В толщах доломито-известняковой и известняков с биогермами и биостромами установлено развитие диагенетической доломитизации, при полном отсутствии проявления этого процесса по образованиям карбонатной толщи.

Породы доломито-известняковой толщи отличаются отсутствием значимых примесей глинистых минералов. Для них установлено широкое проявление диагенетической доломитизации по цементной массе породы. Возможность проявления процесса вторично-катагенетической (гидротермальной) доломитизации ограничивается преобразованием скелетных остатков, которые сохранили до этого момента первичный кальцитовый состав и незамещенной ранее диагенетическим доломитом части цемента.

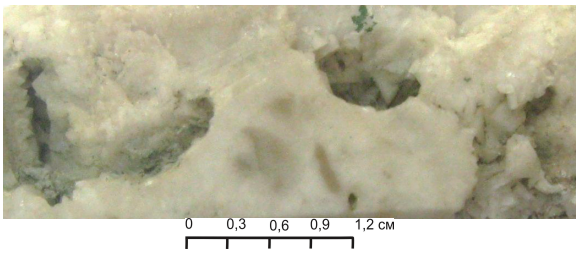


Рис. 1. *Доломит замещения с полыми кавернами. Урманская скв. 9*

Образования толщи известняков с биогермами и биостромами в диагенезе доломитизированы как по массе цемента, так и по скелетным остаткам. Здесь гидротермальная доломитизация может проявиться приблизительно равномерно по всей массе породы, но возможности проявления процесса ниже, чем в известняках доломито-известняковой толщи.

Перспективными для проявления процесса гидротермальной доломитизации являются известняки карбонатной толщи, где диагенетическая доломитизация не проявилась и замещению может подвергаться вся масса породы (рис. 1).

Таким образом, проявление процесса вторично-катагенетической доломитизации в рассматриваемых толщах возможно: в доломито-известняковой по незамещенным в стадию диагенеза органическим остаткам и остаточному кальциту цемента, в толще известняков с биогермами и биостромами по всей массе породы, не замещенной доломитом в стадию диагенеза, а в толще карбонатной – по всей массе породы.

Вторично-катагенетическое выщелачивание, сопровождающееся процессами каолинизации и сидеритизации

Развитие этого процесса установлено в образованиях кремнеаргиллитовой с радиоляритами толщи верхнего девона и толщах (известняков окварцованных со спонголитами, туфогенно-глинистой с прослоями известняков) раннего карбона [5], характеризующихся повышенным количеством биогенного кремнезема в составе пород (занимают в доюрском рельефе повышенное положение). Особенностью проявления процесса является его связь с трещинной тектоникой.

В кремнеаргиллитовой с радиоляритами и туфогенно-глинистой с прослоями известняков толщах происходит вынос биогенного кварца, слагающего раковины радиолярий (рис. 2) и спикулы губок. По образованиям толщи известняков окварцованных происходил вынос остаточного кальцита, не полностью замещенного в стадию диагенеза в результате проявления диагенетического окварцевания. В результате проявления процесса во всем толщах, где установлено его проявление, установлено развитие по трещинам новообразованного каолинита и сидерита.

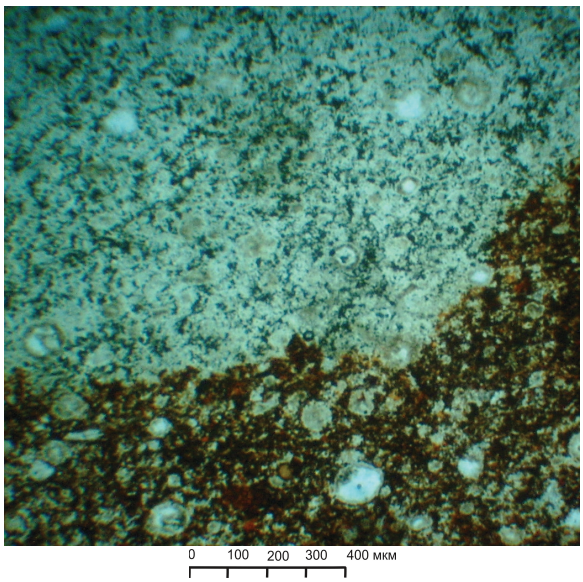


Рис. 2. *Радиолярит, пропитанный окрашенной смолой под давлением. Видны раковины радиолярий, выполненные кварцем, погруженные в глинисто-кремнистый, пористый цемент. Калиновая скв. 13*

Кроме описанных толщ, перспективных для формирования пород-коллекторов, развитие данного процесса установлено в толще глинисто-карбонатной псефитолитовой нижнего девона. Породы состоят из крупных обломков известняков, погруженных в глинисто-карбонатный цемент. Из вторичных процессов первоначально проявился процесс гидротермальной доломитизации (часть обломков нацело замещаются доломитом) с образованием мелких каверн. Затем следует проявление процессов каолинизации и сидеритизации, кото-

рые полностью преобразовывают цемент, который в результате превращен в микропористый агрегат. Формируются породы-коллекторы, состоящие из кавернозных доломитов, сцементированных микропористым каолинит-сидеритовым агрегатом.

Отсюда следует вывод о проявлении данного процесса после процесса гидротермальной доломитизации.

Вторично-катагенетическое выщелачивание, с развитием инкрустационного доломита

Наиболее лучшие коллекторские свойства пород сформировались в результате проявления процесса выщелачивания, сопровождавшегося выносом из породы, имеющегося в ней карбонатного материала. Воздействие процесса установлено как по карбонатным, так и по кремнисто-карбонатным и кремнисто-глинистым образованиям девонского возраста, рассматриваемым нами в настоящей статье. Данный процесс проявился после описанных выше гидротермальной доломитизации и гидротермального выщелачивания, сопровождающегося в кремнисто-карбонатных и кремнисто-глинистых породах проявлением вторичного каолинита с сидеритом.

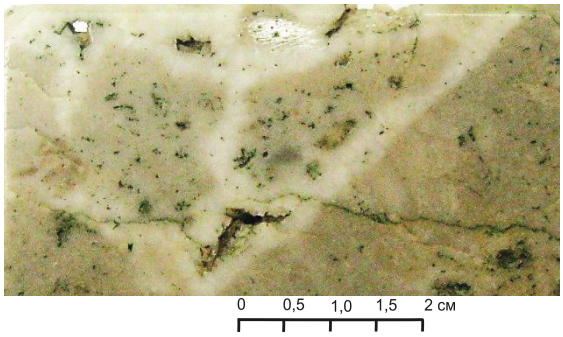


Рис. 3. *Доломит замещения с двумя системами трещин, подверженный процессу гилротермальной доломитизации, затем гидротермального выщелачивания. По трещинам первой генерации отлагался чистый доломит, трещины второй генерации открытые. Видны каверны с инкрустационным доломитом*

Установлен вынос биогенного карбонатного и кремнистого материала: доломита из диагенетически и гидротермально доломитизированных известняков толщи известняков с биогермами и биостромами и из гидротермально доломитизированных известняков карбонатной толщи; биогенного кварца и остаточного кальцита из толщи известняков окварцованных со спонголитами; биогенного кварца из аргиллитов толщи туфогенно-глинистой с прослоями известняков; диагенетического и гидротермального сидерита из пород толщи кремнеаргиллитовой с радиоляритами. Процесс сопровождается развитием инкрустационного доломита (рис. 3) в доломитах замещения карбонатной толщи; в спонголитах толщи известняков окварцованных со спонголитами.

Особенности проявления трех гидротермальных процессов

Для гидротермальных процессов установлена последовательность их проявления: доломитизации последовал процесс выщелачивания, сопровождаемый развитием вторичного каолинита с сидеритом; завершающим является выщелачивание с проявлением инкрустационного доломита. При анализе значений пористости и трещинной проницаемости установлены зависимости, характерные для проявления того или иного из описанных выше процессов (таблица).

В приведенных формулах первая цифра отражает начальные значения пористости при построении кривой зависимости, числовое значение параметра «x» отражает наклон полученной кривой. При вторично-катагенетической доломитизации по породам толщ доломито-известняковой и карбонатной в трех выборках при изначальном различном значении пористости характер поведения кривой зависимости очень близок, что указывает на то, что процесс проявился, в основном, в формировании пустотного пространства, и проницаемость связана с матрицей, т. е. процесс гидротермальной доломитизации проявился в замещении определенных масс пород, примыкающих к трещинам при незначительной проницаемости самих трещин.

Таблица. *Зависимость значений пористости y от проницаемости x при проявлении различных вторично-катагенетических процессов (ВК) в палеозойских отложениях юго-восточной части Нюрольского осадочного бассейна*

Процесс	Возраст	Характер зависимости
ВК доломитизация по породам доломитово-известняковой ($S\text{-}D_1$) и карбонатной толщ D_3	$S\text{-}D_1$	y=0,47+0,009x
	$S\text{-}D_1$	y=1,6+0,01x
	D_3	y=0,64+0,12x
ВК выщелачивание по карбонатной толще D_3	D_3	y=1,50+0,28x
ВК выщелачивание. Толща кремнеаргиллитовая с радиоляритами	D_3	y=1,33+0,2x

При изучении зависимости пористости от проницаемости в результате проявления процесса гидротермального выщелачивания поведение кривых зависимости значений пористости от проницаемости как в карбонатных (карбонатная толща), так и кремнисто-глинистых породах (кремнеаргиллитовая с радиоляритами толща) очень близок по наклону полученных зависимостей, что отражает факт, что при повышении проницаемости пропорционально растет и пористость, а это – следствие проницаемости трещин, при меньшем участии проницаемости по матрице породы.

Формирование по палеозойским отложениям зон трещинной проработки

Трещины или зоны трещиноватости, по которым проявляется преобразование карбонатных по-

род палеозойского возраста, широко развиты на изученной территории. Примером такой зоны является территория Северо-Останинского месторождения [6, 7], где пробурен дублер скважины, дающей постоянный приток нефти. Она попала в слабо измененные породы, почти не затронутые вторичными процессами, и нефти не дала. Вероятно, существует серия зон метасоматически-трещинных колллекторов, аналогичных установленным для Северо-Останинской площади, обнаружение которых в будущем повысит перспективы нефтегазоносности Западно-Сибирской геосинеклизы.

Установленная нами ранее [6] связь развития пород-коллекторов в палеозойских отложениях Нюрольского осадочного бассейна с тектоническими нарушениями северо-западного и северо-восточного простирания, вероятно, проявляется в системе взаимосвязанных протяженных разломов, составляющих определенную сетку, пересекающую палеозойский фундамент. При наложении активных разломов этой сетки на чистые по составу карбонатные отложения палеозойского возраста, происходит преобразование палеозойских пород гидротермальными процессами, и формируются залежи и месторождения трещинно-метасоматического типа по схеме, предложенной нами для Северо-Останинского месторождения [6].

Выводы

1. По доюрским отложениям юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы во вторично-катагенетический этап их преобразования проявились три вида гидротермально-метасоматических процессов, ведущих к формированию пород-коллекторов: доломитизация; выщелачивание, сопровождаемое процессами каолинизации с сидеритизацией; выщелачивание с развитием инкрустационного доломита.
2. Породы-коллекторы трещинно-метасоматического происхождения представлены в виде зон, ориентированных вертикально или под различными, в том числе острыми углами к доюрской поверхности. Геометрия их выходов на доюрскую поверхность имеет северо-западное и северо-восточное простирание в виде полос, сопряженных с разломами соответствующего направления.
3. В зонах пересечения полосами гидротермальной проработки толщ карбонатных пород сформированы ловушки нефти и газа метасоматически-трещинной природы, которые могут быть развиты самостоятельно вне связи с доюрской поверхностью, а также могут составлять с ловушками нефти и газа, развитыми в корах выветривания, единую систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Коры выветривания доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 77–81.
2. Конторович А.Э., Иванов И.А., Ковешников А.Е. и др. Геологические условия нефтегазоносности верхней части палеозойского разреза Западной Сибири (на примере Межовского срединного массива) // В кн.: Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа / под ред. И.С. Грамберга и др. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 152–171.
3. Конторович В.А. Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений Западной Сибири (на примере Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления) // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 538–547.
4. Terleev A.A., Tokarev D.A., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Koveshnikov A.E., Sennikov N.V., Tatianin G.M. New paleontologycal data from the Upper Vendian of the Chkalovskoe Territory of the Fore-Yenisei sediment of the West Siberian Megabasin (boreholes 10, 17, 26, 501) // Neoproterozoic Sedimentary Basins Stratigraphy, Geodynamics and Petroleum Potential: Труды Междунар. конф. – Новосибирск, 30 июля – 02 августа 2011 г. – Новосибирск: IPGG SB RAS, 2011. – P. 100–102.
5. Ковешников А.Е. Литология и закономерности размещения пород-коллекторов в палеозойских отложениях Томской области: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 1990. – 22 с.
6. Ковешников А.Е., Ежова А.В. Литология и условия образования девонских пород-коллекторов Северо-Останинского нефтяного месторождения (Томская область) // Геологические формации Сибири и их рудоносность. – Томск: ТГУ, 1983. – Вып. 2. – С. 103–106.
7. Бурдаков Д.А., Меркулов В.П. Определение ориентации трещиноватости и слоистости для оптимального заложения скважин в палеозойском карбонатном коллекторе // Современные вызовы при разработке и обустройстве месторождений нефти и газа Сибири: Труды научно-практ. конф. – Томск, ТомскНИПИнефть, 18–19 апр. 2011. – Томск, 2011. – С. 40–41.

Поступила 30.09.2011 г.

Геофизика

УДК 550.83:519.241

К МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АНИЗОТРОПИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Г.В. Ерофеева, Л.Я. Ерофеев

Томский политехнический университет
E-mail: geof@tpu.ru

Анализируются возможности процедур оценки анизотропии физических полей, изучаемых в разведочной геофизике. Предлагается новая методика определения анизотропии поля для аномалий второго и более мелкого порядков, на конкретном примере магнитного поля показывается ее эффективность.

Ключевые слова:
Магнитное поле, анизотропия, методика оценки анизотропии поля, природа анизотропии магнитного поля.

Key words:
Magnetic field, anisotropy, method of estimating the anisotropy of the field, nature of the anisotropy of the magnetic field.

При интерпретации материалов геофизических съёмок иногда используется как самостоятельный признак анизотропия поля, который позволяет судить о ряде особенностей геологического строения обследуемых площадей [1–7].

Количественная оценка анизотропии поля в разведочной геофизике проводится двумя способами. В одном случае по массиву цифр наблюденного параметра поля вычисляется двойная автокорреляционная функция (ДАКФ), в другом – определяются углы направления линий равных значений поля заданных уровней (определяется полярная диаграмма – ПД).

Полученные ПД или ДАКФ дают оценку анизотропии в интегральной форме. В них отражается характер изменений параметра поля по разным направлениям различных порядков. Вклад возмущений поля каждого порядка в общую совокупность (ПД, ДАКФ) является неаддитивным, поскольку процедуры определения ПД и ДАКФ являются селектирующими преобразованиями.

Фильтрующие свойства этих преобразований различны и сводятся к следующему. ДАКФ представляет собой трансформацию поля, состоящую из суммы изменений с теми же частотами, что и исходное, но с измененными амплитудами колебаний – амплитуда каждой последующей гармоники, в сторону роста частоты, резко уменьшается. Действительно, допуская, что функция некоторого параметра поля является чёткой функцией, её можно представить рядом:

$$F(x) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos \omega_k x$$

или

$$F(x) = A_1 \left(\cos \omega_1 x + \sum_{k=2}^{\infty} A_k \cos \omega_k x \right),$$

где A_k – отношение всех амплитуд к наибольшей.

Корреляционная функция $F_{(x)}$ этого поля представляется таким выражением:

$$F^1(x) = \frac{A_1^2}{2} A_1 \left(\cos \omega_1 + \sum_{k=2}^{\infty} A_j^2 \cos \omega_k x \right),$$

из которого видно, что вклад всех гармоник с амплитудами, меньшими A_1, в преобразованном поле с ростом частоты падает.

Получение ПД предусматривает выполнение двух основных операций: вычисление координат точек изолиний и взятие отчёта азимута изолиний. Эти операции по своему селектирующему воздействию не одинаковы. При проведении (вычислении координаты по заданным сечениям) изолиний в качестве независимой переменной выступает функция, а при определении азимута – аргумент.

В первой операции происходит амплитудная селекция, во второй – частотная.

В процедуре проведения изолиний вклад различных возмущений в ПД составляет величину, в первом приближении прямо пропорциональную амплитуде аномалии. Другими словами, разноамплитудные возмущения в ПД представляются различным числом n_a изолиний (сечений), которое, в случае нормального распределения амплитуды параметра поля, определится следующей зависимостью [8]:

$$n_a = \frac{\delta_v}{2\pi\delta_x}\exp\left[-\frac{(a-\overline{x})}{2\delta_x^2}\right], \qquad (*)$$

где a – уровень изолинии (сечения), δ_x – среднее квадратическое отклонение $F(x)$, $\overline{x}$ – математическое ожидание, δ_v – среднее квадратическое отклонение первой производной.

Отсчёты азимута направления линий равных значений поля берутся в равноотстоящих (по изолинии) друг от друга точках, т. е. непрерывная функция заменяется рядом значений. При этом колебания направления изолиний с периодом, близким или меньшим интервала дискретизации, понятно, не фиксируются в ПД, вклад других, более крупных по площади аномалий, с ростом площади возмущений возрастает.

Символами эту процедуру можно записать так:

$$F(x) = \Delta x \sum_{k=-\infty}^{\infty} F(k\Delta x)\delta(x-k\Delta x) = \Delta x F(x) U_{\Delta x}(x),$$

где Δx – интервал дискретизации функции $F(x)$, $\delta(x–k\Delta x)$ – дельта-функция Дирака, а

$$U_{\Delta x}(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x-k\Delta x).$$

Эта функция является периодической с периодом Δx. Её можно разложить в ряд:

$$U_{\Delta x}(x) = \frac{1}{\Delta x}\sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\cdot in\cdot\frac{2\pi}{\Delta x}x,$$

в силу этого

$$F_{\Delta x}(x) = F(x)\sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\cdot in\cdot\frac{2\pi}{\Delta x}x.$$

Взяв преобразование Фурье от обеих частей этого равенства и используя теорему смещения в области комплексного переменного, получим следующее выражение для спектра дискретной функции [9]:

$$D_{\Delta x}(i\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D(i\omega - i\frac{2\pi}{\Delta x}n),$$

т. е. спектр функции $F_{\Delta x}(x)$ получается суммированием смещенных спектров непрерывной функции $F(x)$. Смещение определяется величиной Δx. Чем меньше эта величина, тем дальше отстоят смещенные спектры и, стало быть, меньший диапазон их перекрывается.

Итак, применяемые в настоящее время оценки анизотропии физических полей, произведенные непосредственно по результатам наблюденных значений поля, позволяют определять «неизомерность» значительных по площади аномалий, которые, как правило, являются и доминирующими по амплитуде. Такие возмущения несут информацию о наиболее крупных геологических неоднородностях, изучение которых с помощью геофизических методов обычно не требует особых способов анализа, основные черты доминирующих возмущений, в том числе и их неизомерность, легко выявляются при визуальном изучении планов изолиний наблюдаемых полей.

На практике чаще всего необходимо уделять больше внимания аномалиям второго и более мелкого порядка. Их анизотропия по-разному проявляется в ДАКФ и ПД.

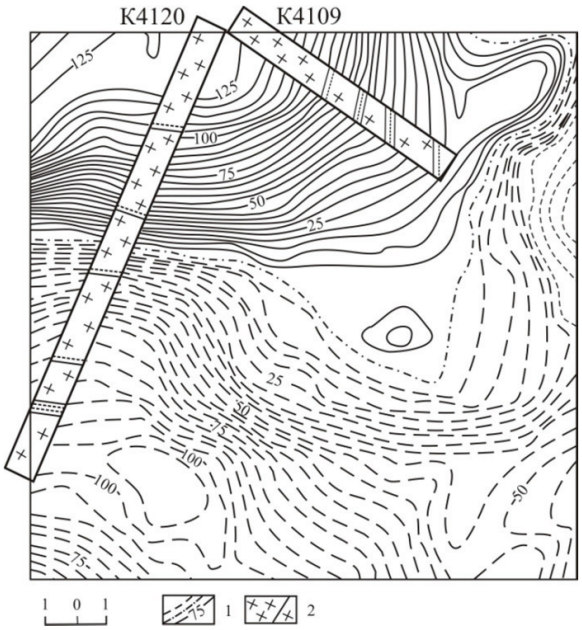


Рис. 1. *Магнитное поле и развитие трещиноватости в гранодиоритах на пл. № 25 Центрального массива: 1) изолинии индукции в нТл; 2) гранодиориты с трещинами по полотну канав*

Для определения возможностей оценки средне – высокочастотного диапазона анизотропии способом построения ПД и ДАКФ были использованы материалы магнитной съемки на 117 площадках, расположенных в пределах Центрального золоторудного месторождения Кузнецкого Алатау (размер 20×20 м, сеть наблюдения 2×2 м, точность измерений 1 нТл).

Для примера поле одной из площадок в виде изолиний показано на рис. 1. Вычисление ДАКФ производилось по методике [10], с предварительным направленным суммированием значений приращений индукции по трем и пяти соседним профилям и вычитания суммарного среднего графика из исходных рядовых. Направление суммирования второго порядка было принято 30° (СВ направление, отчетливо

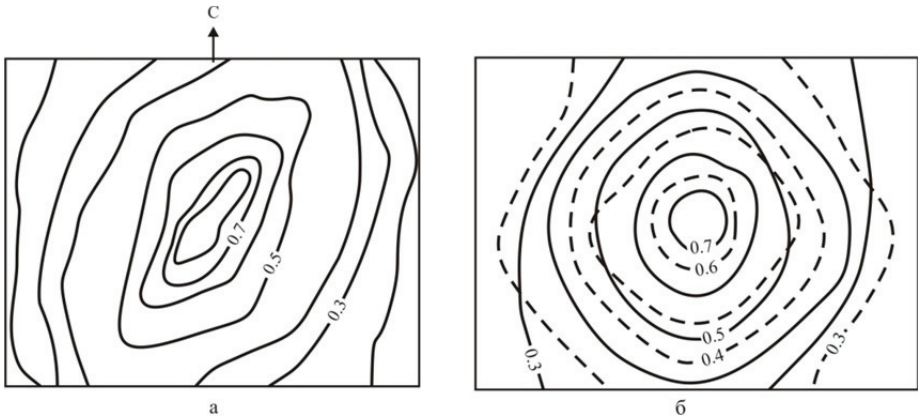


Рис. 2. *Двухмерные автокорреляционные функции магнитного поля первого (а), второго и третьего (пунктир) (б) порядков*

проявляющееся на ДАКФ первого порядка, рис. 2, *а*). Все ДАКФ высоких порядков (2, 3 и 4-го) оказались изомерными. ДАКФ второго и третьего порядков, для примера, изображена на рис. 2, *б*.

Анализ анизотропии поля путём построения ПД произведён по схеме, при которой осуществлялась амплитудная фильтрация. Сущность используемого преобразования заключается в следующем.

По результатам определения азимута простирания равных значений приращений индукции (изолиний) строятся частные диаграммы для групп соседних изолиний, включающих каждая по нескольку изолиний. Число их в группе, также как и число групп, определяется степенью «сложности» поля и, как показывает практика применения предлагаемого способа, составляет 3–6. Построение ПД целесообразно осуществлять в такой последовательности. В начале строится общая диаграмма для 3 или 5 изолиний, среди которых средней изолинией является нулевая изолиния, которая должна соответствовать значению параметра поля, близкому к значению его математического ожидания. Диаграммы третьего и последующих уровней строятся по 4 или 6 (четному числу) изолиниям, одна половина которых берется из отрицательной, другая – из положительной областей изменения параметра.

Нетрудно видеть, что эти диаграммы отражают простирание различных совокупностей аномалий. Диаграмма первого уровня, согласно зависимости (*), характеризует простирание наибольшей части возмущений поля, второго уровня – главным образом тех аномалий, амплитуды которых больше этого уровня, третьего уровня и т. д.

Такая приближенная оценка анизотропии даёт возможность определить наличие и выявить преимущественные направления в простирании линейно-вытянутых элементов геологического строения обследуемых площадей, создающих аномалии высоких порядков.

На рис. 3 приведены полярные диаграммы направленности изолиний приращений вертикальной составляющей амплитуды индукции магнитного поля выше упомянутых 117 площадок съемки. ПД (рис. 3, *а*) построена по всем изолиниям (сечение 5 нТл), т. е. она общая, отражает направленность всех изодинам, но в разной степени, диаграмма рис. 3, *б* – пяти изолиний: +10; +5; 0; –5; –10, следующие – шести: +15; +20; +25; –15; –20; –25 и т. д.

По диаграммам рис. 3, *б*, *в*, можно видеть, *во-первых*, что в магнитном поле присутствует две малоамплитудных, но многочисленных группы соиз-

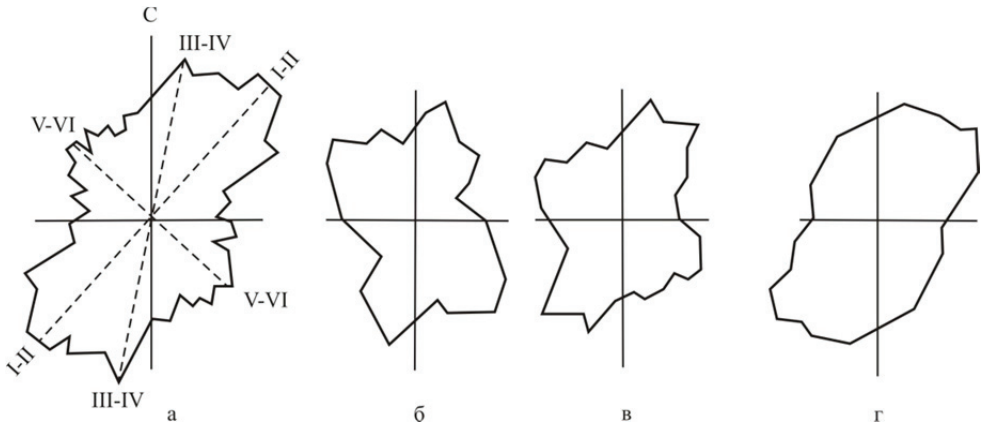


Рис. 3. *Общая (а) и частичные (б–г) полярные диаграммы направленности изолиний магнитного поля I–II и далее (пунктир) – направления систем трещиноватости и их номера Центрального диоритового массива*

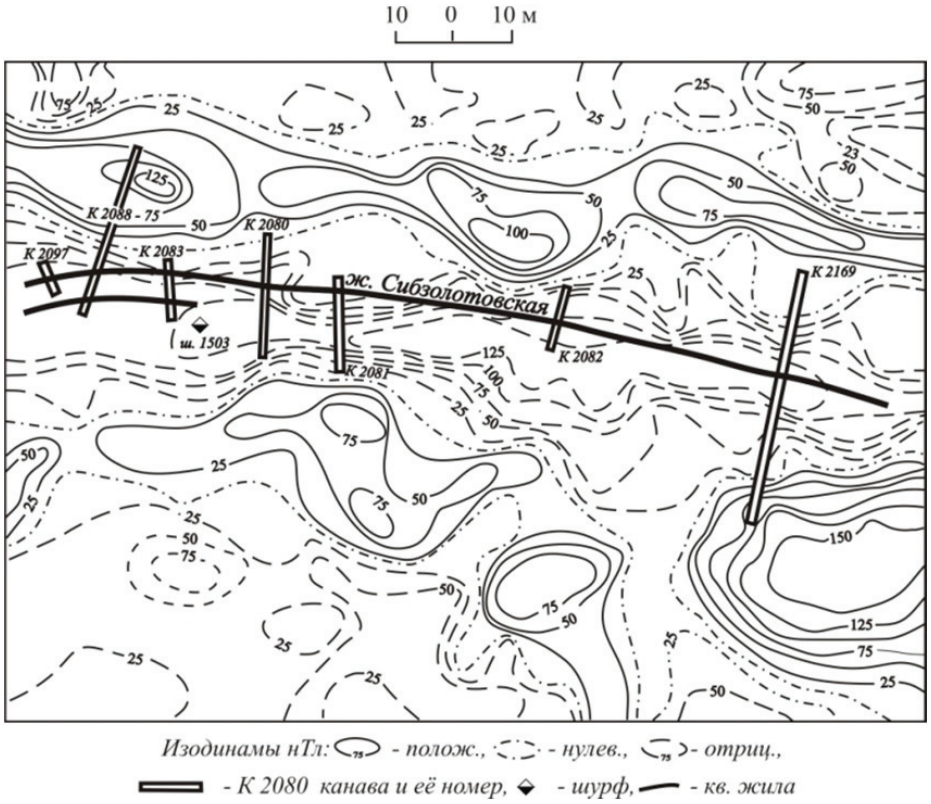


Рис. 4. *Магнитное поле над золоторудной жилой Центрального месторождения*

меримых и существенно неизомерных аномалий, оси которых в большинстве своём простираются в северо-западном и северо-восточном направлениях и, *во-вторых*, что возмущения северо-западного направления имеют в среднем меньшую амплитуду по сравнению с северо-восточным, которое отражает простирание наиболее интенсивных по амплитуде аномалий рудных жил.

Из диаграммы рис. 3, *г*, следует, что изолинии, значения которых превышают ±(25...30) нТл, принадлежат главным образом к наиболее крупным по амплитуде и площади неизомерным аномалиям северо-восточного направления. Именно эти возмущения определяют в целом общую форму ПД и ДАКФ. Доминирующие аномалии обусловлены, главным образом, чередованием участков слабомагнитных (лейкократовые разности) пород с повышенно магнитными (меланократовые разности) участками пород эллипсовидной формы, ориентированных большей осью параллельно контактовой зоне массива с вулканическими образованиями основного и среднего составов.

Центральное месторождение золота Кузнецкого Алатау эксплуатировалось более 100 лет. Значительная часть его рудного поля детального изучена: составлена подробная геологическая карта масштаба 1:5000, определено его тектоническое строение, вплоть до закономерностей развития элементов прототектоники в гранитоидном массиве, вмещающим рудные тела кварцево-жильного типа [11, 12].

На общей диаграмме направленности изодинамии (рис. 3, *а*) показаны доминирующие направления линейно вытянутых неоднородностей: рудных жил, даек, «незалеченных» разрывных нарушений различного порядка. Все эти элементы в магнитном поле сопровождаются весьма неизомерными в плане аномальными зонами, обуславливающими анизотропность поля. Наиболее интенсивные аномалии создают рудные тела СВ простирания, совпадающие с простиранием наиболее развитых I–II систем трещиноватости, рис. 3, *а*. Для примера на рис. 4 показано магнитное поле над одной из таких жил – «Сибзолотовской».

Сопоставляя геологические данные с анизотропией магнитного поля массива, можно видеть, что этот признак поля, определяемый по диаграммам ПД, весьма информативен.

Выводы

Процедуры оценки анизотропии физических полей с использованием двойной автокорреляционной функции и полярных диаграмм существенно различаются: в первом случае проявляется неизомерность наиболее крупных по площади и интенсивности аномалий, анизотропия возмущений второго и более мелкого порядка практически не фиксируется, во втором случае направленности изодинам находят заметное отображение, их анизотропию можно оценивать и представлять в «чистом» виде, что позволяет судить о геологическом строении обследуемых площадей, их тектонических структурах и связанных с ними геологических образованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин А.А., Петров А.В. Основные процедуры обработки и интерпретации нестационарных геофизических полей // Геофизика. – 2007. – № 3. – С. 63–70.
2. Барышев А.С. Статистический анализ направлений изолиний гравитационного и магнитного полей // Сб. науч. тр.: Состояние и перспективы развития геофизических работ в Восточной Сибири / под ред. Г.С. Вахромеева. – Иркутск: Иркутский политехнический университет, 1993. – С. 11–14.
3. Дашевская Е.А., Стевас Г.М. Статистический анализ и взаимосвязь магнитного поля и простирания пород на Украинском щите // Геология и разведка. – 1974. – № 3. – С. 135–138.
4. Horton C.W., Hempkins W.B., Hoffman A.A. A statistical analysis of some aeromagnetic maps from the northwestern Canadian Shield // Geophysical. – 1964. – V. 29. – P. 4–8.
5. Брусиловский Н.В. и др. Магнитное поле и генезис хребта Сакура, Курильская котловина // Геофизика. – 2008. – № 6. – С. 60–70.
6. Елисеев И.С. Интерпретация гравиметрических материалов с использованием угла вектора полного нормированного градиента при изучении верхней мантии // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 3–7.
7. Федюк В.И. Микромагнитная съемка и ее геологические возможности. – М.: Гостоптехиздат, 1968. – 64 с.
8. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
9. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960. – 652 с.
10. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
11. Алабин Л.В. Центральный массив Мартайгинского гранитоидного комплекса (Кузнецкий Алатау) // В кн.: Магматические формации Сибири и Дальнего Востока / под ред. Ю.А. Кузнецова. – М.: Наука, 1971. – С. 169–213.
12. Баженов В.И., Митюшин А.М. Основные черты структуры Центрального золоторудного месторождения (Мариинская тайга) // В кн.: Геология золоторудных месторождений Сибири / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: Наука, 1970. – С. 79–87.

Поступила 24.05.2011 г.

УДК 550.83:551.3

ДИСКРЕТНЫЕ ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ГЕОФИЗИКЕ

В.Н. Устинова, И.Г. Устинова

Томский политехнический университет
E-mail: ustinovavn@tpu.ru

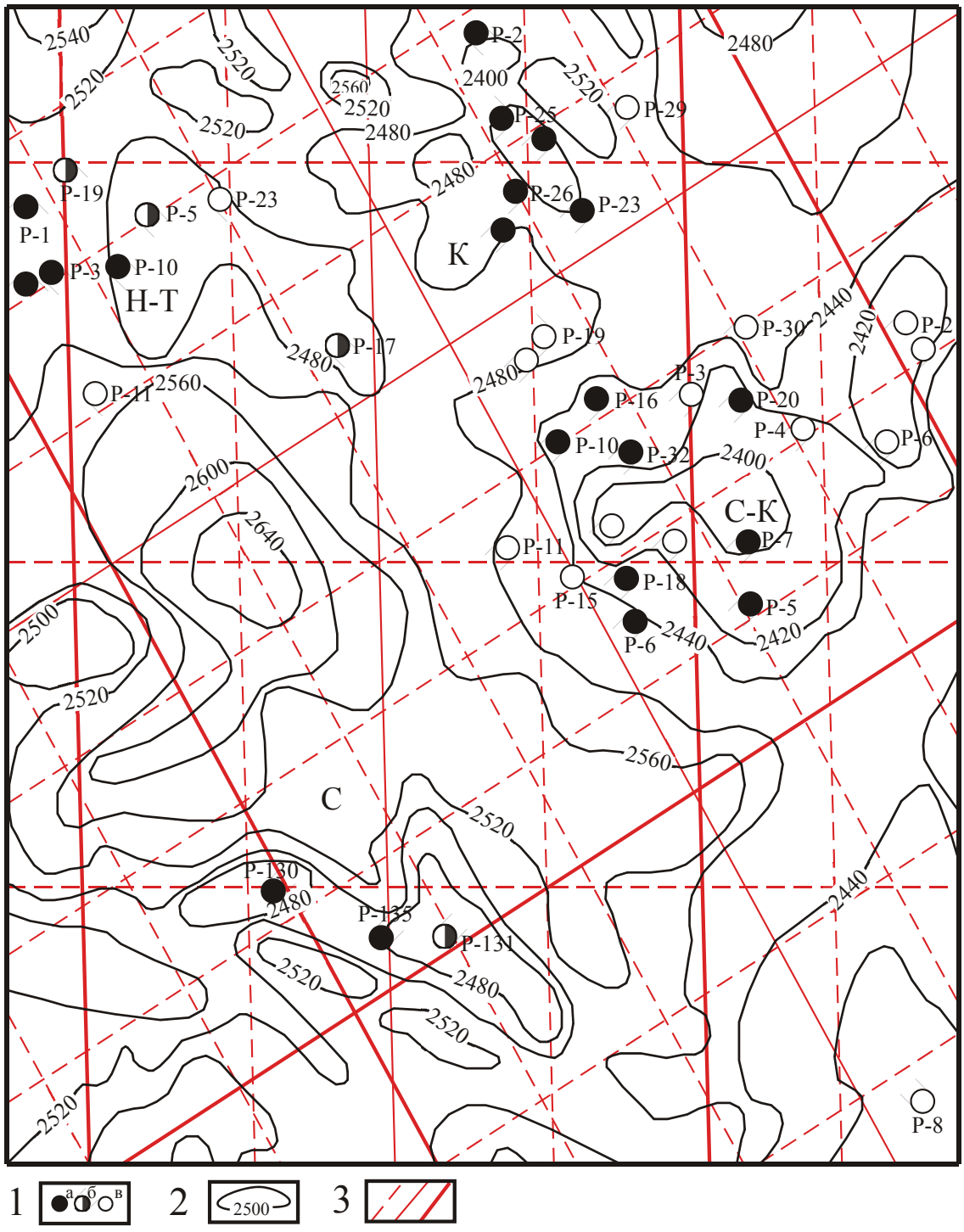
Дискретизация, иерархическая вложенность и наличие типовых форм геологических объектов и геофизических полей позволили выполнить их ранжирование, разработать вероятностно-статистические методы анализа подобных систем и разделения полей. Установлено наличие типовых форм для сейсмических структур; отражённых сейсмических сигналов; в морфологическом проявлении сейсмофаций, вмещающих залежи углеводородов; в пространственном сочетании структурообразующих трещин. Типизация форм структур, морфологических форм геофизических аномалий, сейсмического сигнала с привлечением автокорреляционного анализа нашла применение в процедурах восстановления сейсмического сигнала и структурных построениях, при формировании эффективных графов обработки и интерпретации данных сейсморазведки.

Ключевые слова:
Сейсмоморфоструктурные карты; типы морфоформ структур, модели сейсмических сигналов; регулярная сеть тектонических трещин; вероятностно-статистическая типизация.

Key words:
Seismic morphological maps, types of morphological forms for structures, model forms of seismic signals, regular network of tectonic fractures, probabilistic statistical typing.

Упорядоченность и иерархическая соподчинённость элементов геологических структур и геофизических полей обращает на себя внимание многих исследователей. Структура вложенности, иерархизации, соподчинения элементов структур имеет некоторые черты подобия [1]. Подобие в форме и иерархической структуре объектов позволяет формализовать процесс типизации соподчинённых составляющих, создать классы моделей геолого-геофизического строения нефтегазоносных месторождений и ловушек нефти и газа. Авторы статьи работают в направлении формализации подходов и разработки алгоритмов распознавания форм структур, типизации форм сейсмических сигналов с целью повышения качества прослеживания сейсмических отражений, структуропостроения, выявления участков высокоёмких коллекторов и зон максимального нефтегазонакопления на месторождениях нефти и газа Западно-Сибирской плиты (ЗСП). Дискретизация, вложенность и наличие типовых форм в структуре вещества позволяют разработать математические модели нефтегазовых объектов, где для формализации используются закономерности подразделения вещества, формы вложенности структурных фрагментов, их сочетания и последовательности взаимного дополнения. Наличие подобия и вложенности является основой для разработки математических методов их анализа и выделения факторов, благоприятствующих нефтегазонакоплению, позволяет разработать новые критерии локализации нефтегазоперспективных объектов и зон высокоёмких коллекторов.

Дискретность и вложенность геолого-геофизических систем имеет сложную пространственную структуру. Геолого-геофизические объекты на любом из изучаемых уровней организации есть система систем и могут рассматриваться как упорядоченная совокупность дискретных составляющих. При создании физико-геологической модели месторождений нефти и газа изучается их проявление в структурных планах и на сейсмических и сейсмогеологических разрезах, в разрезах скважин. Каждую из реализаций физических полей: трёхмерную, двумерную или одномерную можно рассматривать как моносистему. Установлено, что геолого-геофизическая моносистема может быть



1 2 3

Рис. 1. Тектоническая трещиноватость по результатам морфоструктурного анализа для структурных моделей локальных поднятий: Калиновой (К), Северо-Калиновой (С-К), Нижнетабаганской (Н-Т), Солоновской (С) площадей: 1) глубокие скважины: а) продуктивные, б) с нефтепроявлениями, в) пустые; 2) стратоизогипсы по отражающему горизонту $II_а$, в м глубины; 3) тектонические трещины: первого, второго, третьего порядков, соответственно; структурная карта на основе построений Г.И. Берлина

представлена как двух, трёх и более компонентная – составляющих меньших порядков [1]. В вертикальном разрезе дискретность и вложенность объектов проявляется в наличии разнопорядковых циклитов. На поверхности Земных оболочек она выявляется в мозаичной структуре поверхности, в наличии типовых форм структур [2, 3]. Дискретность оболочечных объектов имеет прямоугольную симметрию [1–7], которая осуществляется через сеть ортогональных и радиальных трещин, либо – квазиконцентрическую [8], связанную со структурами центрального типа. Прямоугольные и концентрические блоки структурно согласованы и являются составными частями дискретно-иерархической [1] блоковой системы.

При анализе морфологических особенностей поверхности фундамента ЗСП фиксируется его блочное строение, проявляющееся и в строении чехла. Крупные блоки (первого порядка) размерами (20...24)×(23...32) км в свою очередь разбиты на блоки последующих порядков, вкладывающиеся друг в друга: размеры блоков порядка (6...8)×(4...5) км и мельче (рис. 1). Факт ячеистого строения фундамента свидетельствует о контроле размещения тектонических трещин планетарными силами [4], природа которых вероятно связана с неравномерным ротационным режимом Земли.

По материалам сейсморазведки (наличие зон смещения осей синфазности, повышенного поглощения, ухудшения прослеживаемости отражённых волн на временных разрезах; ориентированные, линейно-вытянутые аномалии величин скорости по палеоповерхностям и пр.) можно выявить палеоследы тех закономерно-направленных деформаций, которые в различные циклы тектогенеза определили условия тектонического развития структурных элементов разного порядка, влияли на динамику онтогенеза нефти и газа, суммарный потенциал нефтегазоносности, соотношение жидкой и газообразной фаз. В контуре нефтегазоносности (рис. 1) зачастую третий и четвертый порядок трещин [5], которые, как правило (на месторождениях юго-востока плиты: Мыльджинское, Крапивинское, Игольско-Таловое, Двуреченское, Калиновое, Герасимовское и др.), не нарушают коллектор, а способствуют формированию открытой пористости и зональному распределению участков повышенной проницаемости, локальности в распределении высокоёмких ячей коллектора. Нарушения первого, второго порядков контролируют блоки, формирующие структуры первого и второго порядка, где осуществляется в основном переток тепла и флюидов, аномальное изменение сейсмических параметров в них указывает на наличие напряжённо-деформированных участков структур [7] и близкое расположение ловушек нефти и газа.

Используя знание о расположении и иерархии планетарной сети трещин (разломов) по интенсивности вышеперечисленных сейсмических аномалий можно прогнозировать зоны повышенных планетарных напряжений и целенаправленно вести поиск нефтегазоносных отложений.

Сочетания разномасштабных геоблоков на поверхности Земли образуют симметричные системы [6, 9, 10], среди которых выявляется ограниченное число типовых форм. Типовые формы строения структурно-вещественных комплексов проявляются в квазирегулярном соподчинении основных структурно-морфологических элементов систем, представляющих собой «вихревые», круговые, спиральные, «сигмоидные», двух-, трёх- и многолепестковые [2, 3, 9, 10] системы элементов рельефа – контрастно проявляющиеся, например, на структурной сейсмической карте, представляющие собой равновесные структурно-вещественные комплексы [9, 10], в близких морфологических типах проявляющиеся в полях сейсмических параметров и в потенциальных полях. Морфологическая типизация форм сейсмоструктур актуальна при ранжировании сейсмофаций. Геохронологическая повторяемость режимов осадконакопления, форм структур и типов фаций позволяет разработать типовые формы сейсмических сигналов для мезоциклитов.

Наличие признаков симметрии и подобия в строении вещества земной коры, которое есть следствие близкой природы структурообразующих процессов, циклического их развития, получило отражение в некоторых обобщениях (М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко, Я.Б. Зельдович, Л.И. Красный, М.Л. Минц и др.) и классификациях (В.Е. Хаин, О.В. Петров, Чен Года, Н.П. Юшкин и др.), авторы которых признают системное подразделение геокомплексов и системную их организацию, как в пространственной иерархии, так и в их временном развитии (Н.Б. Вассоевич, С.Н. Бубнов, И.А. Вылцан, Л.П. Ботвинкина, Ю.А. Жемчужников, С.Л. Афанасьев, В.В. Вебер, Г.А. Иванов, А.В. Македонов и многие другие).

Справедливы высказывания о делимости, иерархическом соподчинении дискретных геологических объектов, однако значительно меньшее внимание в публикациях уделяется упорядоченности, соподчинённости, симметрии во взаимосвязанных дискретных составляющих вещества, являющихся «частицами» как малых геологических систем (блоков, структур), так и достаточно крупных (плит, континентов) и гигантских (включая Землю в целом, Солнечную систему, Галактику, Вселенную). Во всех мезо-, макро-, мега- и гигасистемах [9] типы сочетания структурных элементов морфомоделей имеют близкие черты и согласуются с основными типами, предложенными В.Н. Устиновой [9, 10–12].

При моделировании форм сейсмических сигналов авторы изучали циклиты разных порядков: мезо- и макроуровня, в которых отражено строение и взаимное пространственное дополнение нефтегазоносных комплексов и толщь. Представления о делимости, иерархии, симметрии в организации циклитов (элементами которых на юго-востоке плиты являются угли, песчаники, глины и их переходные разности): позволяют построить их уникальные модели дискретизации (в сейсмическом

сигнале отражается циклит мезоуровня) и прокоррелировать одновозрастные отложения, получить представления о латеральной изменчивости продуктивных отложений, об их выклинивании и пространственном распространении.

Базовой информацией о циклической структуре макрокомплексов (например, юрско-валанжинский макроциклит) в нефтегазоносных толщах были временные сейсмические разрезы. Региональные сейсмические профили (под ред. А.Э. Конторовича и др.) позволили авторам изучить особенности локализации толщ с близкой формой макро- и мезоциклитов, выявить особенности формирования и пространственного распространения колебательных движений поверхности осадконакопления ЗСП в различные фазы осадкообразования, получить пространственную модель центрально-зонального распространения упругой волны [9, 10], формирующейся в каждую фазу накопления осадка в виде стоячей волны (фигуры Лиссажу [11]) и осложнённой бегущей волной по направлению основного замыкания пространственной системы, – с фронтальным распространением упругих смещений в виде равновесного «качания», с образованием структурно-вещественных систем типа «пальмового дерева».

Предложенная модель по геодинамическим параметрам согласуется с основными характеристиками иерархических моделей структурообразования В.В. Белоусова [13], по своим динамико-кинематическим характеристикам соотносится с моделью пульсирующего глубинного пустотного пространства, предложенной в нелинейной геодинамике [14]. Построенная модель позволяет объяснить причину многоуровенного заполнения нефтегазоносными отложениями осадочных комплексов, наличие своеобразного латерального скольжения в зональном расположении разновозрастных нефтегазоносных отложений, и латерального дополнения в углеводородном заполнении сопредельных территорий, соседних структур.

Результаты этих исследований позволили установить, что в пределах структур второго порядка юго-востока ЗСП: Каймысовский свод, Пудинский мегавал, Александровский свод, Средневасюганский мегавал, дискретная модель макроциклита юрско-валанжинских отложений (сочетания мощностей вещественных комплексов) подобна и в близких чертах изменяется от подножья к сводам структур с нарастанием мощностей песчаных фаций в смежных отложениях и формированием разрастаний их мощности на склонах. Продуктивный горизонт $Ю_1$ верхнеюрских отложений имеет сложную пространственную структуру с изменением возраста и типа песчаной фации от подножья к своду структуры, но типизация мезоциклита надугольной пачки верхнеюрских отложений (с созданием подножносклоновой, склоновой и сводовой типов моделей для локальных структур) показала возможность наличия ограниченного числа моде-

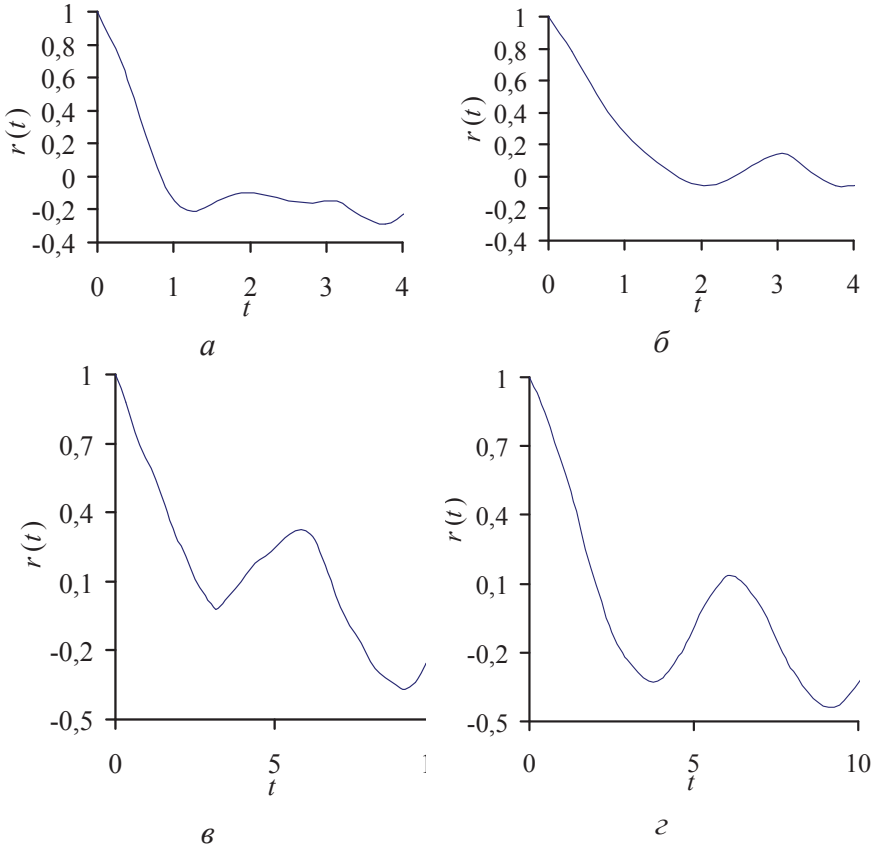


Рис. 2. *АКФ сейсмических отражений, r(t) (1 ед.=10 мс), по группе отражающих горизонтов ЗСП: а) по IV; б) по III; в) по II; г) по I*

лей (и моделей их АКФ) для выполнения прогнозирующей деконволюции (структура мезоциклита предопределяет форму сейсмического сигнала), что позволяет поднять точность реконструкций и определять местоположение продуктивной фации.

Изучение ритмичности осадконакопления (по дискретным моделям мезоритмитов, включающим мощности и физические свойства осадков) показывает изменчивость режима осадконакопления, накладывающегося на строгую иерархическую схему «эмерсия, первая трансгрессия, вторая трансгрессия, иннундация, дифференциация, регрессия» (по С.Н. Бубнову) и определяющего пространственную вариационную модель мигрирующего побережья, аккумулирующего основную группу продуктивных фаций. В каждую фазу осадконакопления изменчивость рельефа поверхности в мезоритме формирует определённый, но зависимый от влияния более крупной структуры, рельеф поверхности, в свою очередь, предопределяющий формирование конкретной фации. Восстановление формы рельефа по перекрывающим песчаный пласт отложениям, с использованием типовой модели сейсмоморфорельефа [9], предоставляет возможность определять сейсмофацию из рельефа палеоповерхности и по картам атрибутов и сейсмических параметров.

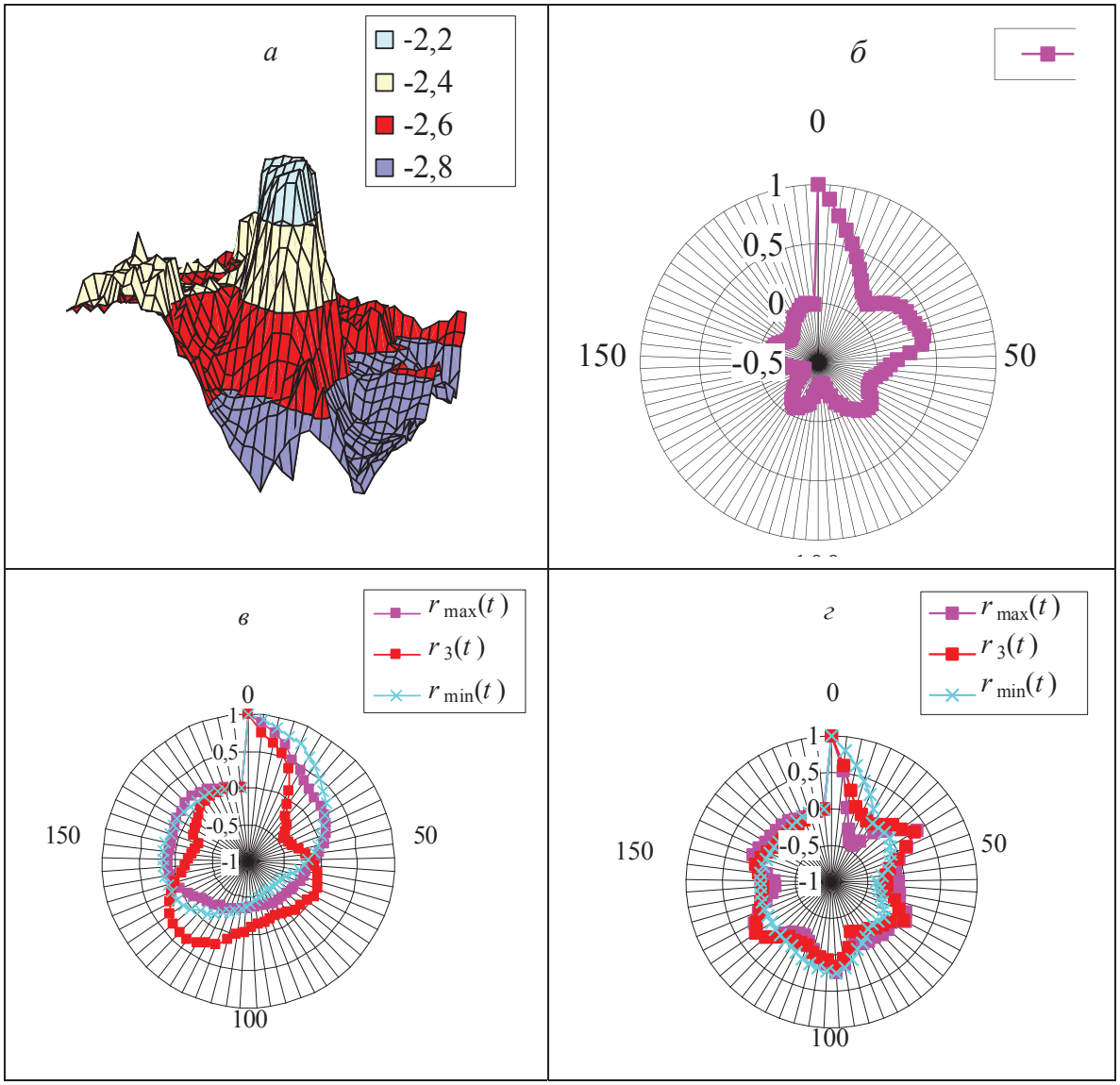


Рис. 3. *Аксонометрическое изображение для структуры второго порядка по горизонту $II_а$ юго-восточной части ЗСП: а) Мыльджинский вал, структурная карта Г.И. Берлина, 3D модель, цветом – глубина до поверхности отражений, в км; диаграммы АКФ ($r_{max}(t)$, t – в $5 \cdot 10^2$ м): б) вычисленная для структурной карты (а) по спирали Архимеда, r=kφ, где φ – угол наклона r к полярной оси, коэффициент k=0,5; в) вычисленные вдоль окружностей различных радиусов: максимальный радиус (12 км) – $r_{max}(t)$, минимальный радиус (3 км) – $r_{min}(t)$, средний радиус (7 км) – $r_3(t)$; в) вычисленные вдоль розы Гвидо Гранди [14], r=asinkφ, a – константа, параметр k=3, a подобрана таким образом, чтобы r достигал своего наибольшего значения – $r_{max}(t)$, наименьшего значения – $r_{min}(t)$, среднего значения – $r_3(t)$*

Структура циклитов, устойчивость ритма осадконакопления определяется жёсткой конфигурацией формирующейся поверхностной «стоячей волны», в морфологических формах которой, в соответствии с фазами перестройки, выявлено 12 устойчивых типов морфоформ [9, 10], охарактеризованных авторами типовой формой АКФ. Наличие типовых форм структур, в том числе, наличие преобладающей формы для каждой изучаемой структуры и преимущественного типа сейсмоморфорельефа – для размещения нефти и газа – даёт дополнительный критерий для статистической параметризации нефтегазоносных объектов и выделения зон наиболее перспективных для нефтегазонакопления.

Создание статистических моделей сейсмических сигналов, их АКФ важно как для восстановления тонких особенностей строения нефтегазоносных толщ, так и для повышения точности обработки сейсмоданных. Модели АКФ для сейсмических сигналов перекрывающих отложений позволяют корректно их восстановить, повысить точность реконструкций горизонтов перекрывающих отложений, что в свою очередь обеспечивает повышение точности структурных построений по продуктивным отложениям и надёжность инверсионных процедур при оценке эффективных сейсмических параметров продуктивных резервуаров. Оценка АКФ волнового поля разноглубинных частей сейсмического разреза для ряда нефтегазовых месторождений юго-востока ЗСП (Крапивинское, Лонтынь-Яхское, Первомайское и др.) показывает возможность создания статистических моделей разновозрастных отложений. В результате расчётов АКФ: для палеогеновых отложений характерны узкие АКФ со слабоинтенсивными вторичными экстремумами и быстрым затуханием боковых осцилляций (рис. 2, *а*), для верхнемеловых отложений – узкие АКФ со значительным вторичным всплеском (рис. 2, *б*), для нижнемеловых – более широкие АКФ со слабоинтенсивными вторичными экстремумами (рис. 2, *в*) и для юрских – широкие АКФ осложнённые среднеинтенсивными вторичными всплесками (рис. 2, *г*).

Систематизация сейсмических структур, морфоформ аномальных полей по геометрическому облику (типу сочетаний элементов) позволяет выполнять фрактальную параметризацию типов структур, оценку их энтропии и размерности Хаусдорфа [12]. Структурные морфоформы грубо подразделяются на 4 основных типа: линейно-вытянутые, овальные, изометричные и сложной формы. Авторами выполнено и более детальное ранжирование [9, 10, 12], но уже такое подразделение позволяет классифицировать морфоформы, определить для них АКФ. Эти параметры помогают в оценке перспектив нефтегазоносности локальных поднятий, в прогнозе по морфорельефу песчаной фации [12]. Так, в указанной последовательности, для этих четырёх морфоформ будут близки АКФ на рис. 2, и наиболее благоприятной для нефтегазонакопления можно признать (из опыта исследований) – овальную форму структуры и тип АКФ для ранжирования, представленный на рис. 2, *б*.

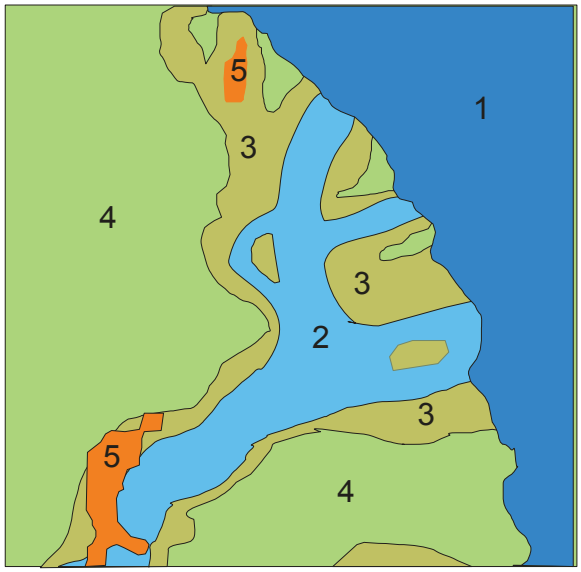


Рис. 4. *Сейсмоморфофациальная реконструкция обстановок формирования песчаных пластов надугольных отложений верхневасюганской подсвиты – продуктивный пласт $Ю_1$ Мыльджинского месторождения (рис. 3, а), фации: 1) устьевых баров; 2) русла реки; 3) дельтового типа; 4) речной поймы; 5) барьерных островов; фациальный комплекс характеризуется как эстуариевый тип дельты (по В.Л. Фишеру). Сейсмофациальная модель для сводовой части Мыльджинской структуры*

Важные сведения о морфологических свойствах аномалий и форме структурных поверхностей можно получить по АКФ $r(t)$; в случае расчёта их по заданным направлениям (геометрическим фигурам), наилучшим образом соответствующим геометрическому образу поверхности. АКФ, вычисленные для структурной поверхности Мыльджинского вала по окружностям, спирали Архимеда и розам Гвидо Гранди, представлены на рис. 3. Полученные АКФ, в свою очередь, несут информацию о пространственных свойствах геофизических объектов, могут использоваться для фильтрации трёхмерных полей. АКФ Мыльджинской структуры по поверхности $II_а$ (рис. 3, *а*) в образе радиального скручивания наилучшим образом описывает литолого-фациальную модель коллекторов верхнеюрских отложений, песчаные осадки которого генетически характеризуются, как осадки дельтового комплекса (рис. 4). АКФ информативны при оценке типа морфоформы и предполагаемого генезиса песчаников продуктивного горизонта нефтегазоносной структуры. Для таких объектов в качестве моделей АКФ характерны более сложные формы, например, представленные на рис. 2, *в*, *г*. Усложнение формы АКФ при расчёте её по окружностям разных радиусов (рис. 3, *г*) показывает, что морфоформа изменяет свои свойства от центра на периферию, фрактальна.

При оценке пространственных характеристик изучаемых объектов информативным оказывается также спектр мощности $W(\omega)$, характеризующий энергетический и частотный состав поля. Различие

в спектрах мощностей для типовых структур геофизических полей, описывающих морфологические особенности структур центрального типа, позволяет разработать для фильтрации объектов заданной формы оптимальные фильтры. Полученные в результате фильтрации карты типов структур или карты энтропии характеризуют для нефтегазоносных территорий локальные поднятия наиболее благоприятные для нефтегазонакопления.

Выводы

Выполнена типизация морфоформ структур и сейсмических сигналов, предложены вероятностно-статистические модели одно- и многомерных объектов для продуктивных отложений Западно-Сибирской плиты. Типизация морфоформ позволила разработать подходы для формирования эффективных моделей автокорреляционной функции при выполнении деконволюции в графе обработки дискретных данных сейсморазведки, создать схемы обработки сейсмоданных, позволяющие повысить точность структурных построений, модели автокорреляционной функции сейсмических отражений. Типизация и иерархизация форм структур стала основой для сейсмоморфофациальной интерпретации, позволила разработать методику локализации сейсмофаций при морфоструктурном анализе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 1999. – 346 с.
2. Ласточкин А.Н. Методика и результаты конструирования общей теории геосистем. I. Универсальная элементная база для геоявлений разной природы // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2001. – Вып. 1. – Сер. 7. – С. 48–57.
3. Гарбар Д.И. Регмагенез древних платформ // Общая и региональная геология, геологическое картирование. – М.: ВИЭМС, 1991. – 45 с.
4. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость. – М.: Недра, 1973. – 656 с.
5. Красный Л.И. Разномасштабная делимость // Вестник РАН. – 2002. – Т. 72. – № 6. – С. 988–997.
6. Устинова В.Н., Устинов В.Г. Сейсмоморфологический анализ при картировании высокоёмких коллекторов. II. Роль тектонической трещиноватости в форме палеорельефа и формировании проницаемых ячей коллекторов // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 63–69.
7. Соловьёв В.В. Структуры центрального типа территории СССР по геолого-геоморфологическим данным. – Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. – 110 с.
8. Устинова В.Н., Вылцан И.А. Циклы в геологии // Известия вузов. Сер. Геология и разведка. – 2004. – № 3. – С. 58–63.
9. Устинова В.Н., Устинов В.Г., Вылцан И.А. О пространственном и временном развитии циклически протекающих событий на Земле // Геофизика. – 2005. – № 5. – С. 43–48.
10. Экология: Структура и морфология / Локтюшин А.А.; Томск. гос. ун-т. – Томск, 1999. – 314 с. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 22.7.1999, № 2410 – В99.
11. Устинова В.Н. Сейсмогеологические модели нефтегазовых месторождений юго-востока Западно-Сибирской плиты: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Санкт-Петербург, 2009. – 46 с.
12. Белоусов В.В. Основы геотектоники. – М.: Недра, 1989. – 382 с.
13. Пущаровский Ю.М., Меланхолина Е.Н., Моссаковский А.А., Руженцев С.В. Глубинная тектоника Земли: Строение, структурная асимметрия, геодинамика геосфер // Доклады Академии наук. – 1999. – Т. 366. – № 1. – С. 88–96.
14. Устинова В.Н., Устинова И.Г. Статистическая параметризация симметричных геофизических объектов // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 36–41.

Поступила 26.09.2011 г.

УДК 550.831.053

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ. ТРЕХМЕРНОСТЬ ОБЪЕКТОВ

В.И. Исаев, Р.Ю. Гуленок*, Г.А. Лобова

Томский политехнический университет
*ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», г. Южно-Сахалинск
E-mail: isaev_sah@mail.ru

Приведена характеристика латеральной изменчивости литофизических свойств нефтегазоносных комплексов локальных объектов. Предложены алгоритм и методика трехмерного геоплотностного моделирования объектов, опоискованных сейсморазведкой, выявления и оконтуривания высокопористых литофаций. Выполнена серия решений обратных линейных задач высокоточной гравиразведки на универсальной по сложности квазиреальной модели. Это позволило оценить точность выявления и оконтуривания разуплотненных литофаций. Получены неприемлемые погрешности решений, если ограничиваться применением алгоритмов и методики двухмерного моделирования. Приведен пример решения трехмерной задачи высокоточной гравиразведки на Верхненышском газоконденсатном месторождении Сахалина.

Ключевые слова:
Высокоточная гравиразведка, плотность и пористость пород, нефтегазоносный комплекс, литофация, трехмерное и двухмерное моделирование, месторождение, Сахалин.

Key words:
High-precision gravimetria, density and porosity of breeds, oil and gas a complex, lithofacies, three-dimensional and two-dimensional modeling, field, Sakhalin.

Введение

В предыдущей статье [1] приведены примеры решения классических прямых и обратных задач гравиразведки на объектах нефтегазовой геологии и сделаны оценки ошибок решений, если не учитывать вертикальный градиент плотности в разрезе одновозрастных отложений. Допущение постоянной плотности приводит к погрешностям моделирования (интерпретации), неприемлемым для решения задач детальной и высокоточной гравиразведки.

В предлагаемой статье выполнены оценки ошибок геоплотностного моделирования, если не учитывать трехмерность объектов нефтегазовой геологии. Оценки получены в результате вычислительных экспериментов на квазиреальных моделях. Приведен реальный пример решения задачи высокоточной гравиразведки на Верхненышском газоконденсатном месторождении [2], выявленном в пределах Нышско-Тымского прогиба Сахалина (рис. 1).

Плотностная и геометрическая характеристика объектов

Опыт изучения латеральной изменчивости коллекторских свойств, плотности осадочных пород и зональности гравитационного поля на нефтегазоперспективных объектах впервые обобщен В.М. Новоселицким [4]. Выявляемые расчетным путем по значениям измерений гравитационного поля зоны уплотнения пород рекомендуется исключать при оценке ресурсов углеводородов (УВ). Отрицательные аномалии плотности объясняются преимущественно разуплотненным состоянием *высокопористых* пород.

Латеральная зональность коллекторских свойств одновозрастных отложений установлена многими лабораторными экспериментами, литолого-петрографическими и петрофизическими исследованиями. В частности, зональность пористости, являющейся важнейшей характеристикой коллекторов, может быть обусловлена рядом факторов. Среди них основными, наряду с очевидным – фациальными условиями осадконакопления, являются катагенез, тектоническая активность, эндогенные углекислотные флюиды, выщелачивание в зоне гипергенеза, а также процессы осернения УВ залежи, сопровождающиеся интенсивным выщелачиванием карбонатной составляющей [5, 6 и др.].

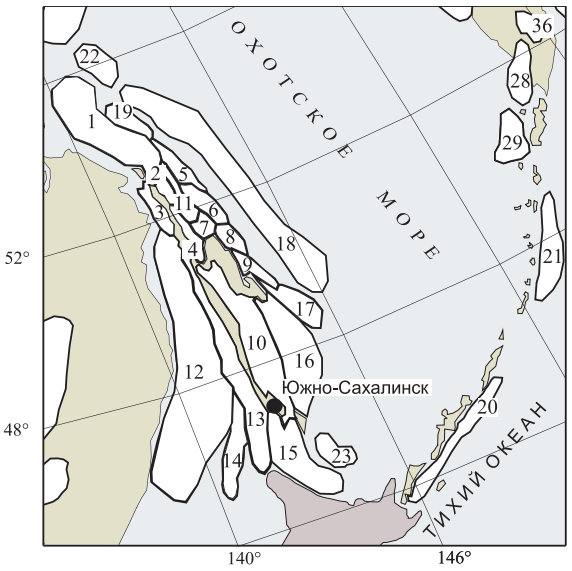


Рис. 1. *Фрагмент обзорной схемы размещения осадочных бассейнов Дальневосточного региона [3]: контуром показана площадь осадочного бассейна и его номер. 11 – Нышско-Тымский прогиб*

Главной закономерностью изменения плотности σ отложений отдельных свит и толщ является экспоненциальное увеличение с глубиной залегания Z:

$$\sigma(Z) = B_0 - B_1 \exp(-B_2 Z) \pm \varepsilon_\sigma .$$

Вместе с тем, свиты и толщи обладают и латеральной литофизической неоднородностью, причем скопления, залежи УВ, как правило, приурочены к высокопористым литофизическим неоднородностям (1...3 км и более). Такие неоднородности имеют дефицит плотности до 0,08 г/см^3 и более. Сейсморазведка, как базовое средство структурного обоснования ловушки, нередко из-за сложных сейсмогеологических условий имеет ограниченные возможности в отношении прогнозирования геологического разреза. В связи с этим рациональным представляется моделирование распределения плотности (пористости) объектов, опоискованных сейсморазведкой, в гравитационном поле.

Предлагается на локальных структурных формах, выявленных сейсморазведкой, проводить объемное (трехмерное) плотностное моделирование на основе решения обратной линейной задачи гравиметрии. Это позволит выявлять аномалии плотности в пределах сейсмического тела – области разуплотнения, отождествляемые с высокопористыми литофациальными разностями.

Алгоритмы моделирования

Математическая модель интерпретации при трехмерном геоплотностном моделировании может быть представлена в виде системы линейных уравнений [7]:

$$\sum_{v=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_v}(A_{0ijv}\sigma_{jv}) + \sum_{v=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_v}(A_{1ijv}\Delta\sigma_{jv}) + (B_0 + B_1 X_i + B_2 Y_i) = V_{Zi},\ i = \overline{1, M}, \quad (1)$$

а также системы линейных двусторонних неравенств

$$\sigma_{jv}^{(н)} \le \sigma_{jv} \le \sigma_{jv}^{(в)},\ v = \overline{1, N},\ \ j = \overline{1, N_v}; \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{jv}^{(н)} \le \Delta\sigma_{jv} \le \Delta\sigma_{jv}^{(в)},\ v = \overline{1, N},\ \ j = \overline{1, N_v}; \quad (3)$$

$$B_0^{(н)} \le B_0 \le B_0^{(в)},\ B_1^{(н)} \le B_1 \le B_1^{(в)},\ B_2^{(н)} \le B_2 \le B_2^{(в)}, \quad (4)$$

где N – число (сейсмических) слоев моделируемой среды; N_v – количество аппроксимирующих блоков в v-м слое; σ_{jv}, $\Delta\sigma_{jv}$ – постоянные составляющие плотности и вертикальные градиенты плотности аппроксимирующих блоков, подлежащие определению; A_{0ijv}, A_{1ijv} – гравитационное влияние на i-ю расчетную точку j-го аппроксимирующего блока из v-го слоя при плотности и градиенте плотности, равных единице; B_0, B_1, B_2 – коэффициенты линейной функции, аппроксимирующие региональный фон, подлежащие определению; X_i, Y_i – координаты расчетных точек сети наблюдений V_{Zi}; $\sigma_{jv}^{(н)}$, $\sigma_{jv}^{(в)}$, $\Delta\sigma_{jv}^{(н)}$, $\Delta\sigma_{jv}^{(в)}$, $B_0^{(н)}$, $B_0^{(в)}$, $B_1^{(н)}$, $B_1^{(в)}$, $B_2^{(н)}$, $B_2^{(в)}$ – нижние и верхние предельные значения постоянных составляющих плотностей, вертикальных градиентов плотностей и коэффициентов линейной функции – количественная мера априорной геолого-геофизической информации о моделируемых параметрах.

В качестве аппроксимирующего блока принимается вертикальная четырехугольная призма с произвольной ориентировкой оснований и плотностью, линейно меняющейся с глубиной (рис. 2). При такой аппроксимации латеральные изменения плотности слоев моделируемой среды и тектонические нарушения учитываются представлением слоя латеральным рядом геоблоков разной плотности (рис. 2, *б*). Плотность задается на верхнем и нижнем основаниях блоков значениями σ_1 и σ_2 – на серединах отрезков, образующих верхнее и нижнее основания вертикальной трапеции (например, трапеции $DCC'D'$, рис. 2, *а*), что удобно для последующих вычислений. Идея такого способа введена Г.Я. Голиздрой [8]. В итоге, такая плотностная параметризация слоев позволяет учитывать изменения плотности как в латеральном направлении, так и в вертикальном – от кровли к подошве.

Поверхность $ABCD$ (рис. 2, *в*) в общем случае не плоская. Для упрощения задачи поверхность заменяется двумя плоскостями ACD и ABC: исходный четырехугольный аппроксимирующий блок разбивается на две треугольные призмы. Расчетным (технологическим) элементом становится вертикальная треугольная призма, плотность которой записывается в виде линейной функции от глубины. Аналитическое решение прямой задачи гравиметрии для выделенного технологического элемента получено и алгоритмизировано в работе [9].

Теоретическую модель (1)–(4) при практической реализации [10] заменяем на эквивалентную, удобную в применении:

$$\sum_{v=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_v}(A'_{0ijv}\sigma_{Zвjv}) + \sum_{v=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_v}(A'_{1ijv}\sigma_{Zнjv}) + (B_0 + B_1 X_i + B_2 Y_i) = Y_{Zi},\ i = \overline{1, M};$$

$$\sigma_{Zвjv}^{(н)} \le \sigma_{Zвjv} \le \sigma_{Zвjv}^{(в)},\ v = \overline{1, N},\ j = \overline{1, N_v};$$

$$\sigma_{Zнjv}^{(н)} \le \sigma_{Zнjv} \le \sigma_{Zнjv}^{(в)},\ v = \overline{1, N},\ j = \overline{1, N_v};$$

$$B_0^{(н)} \le B_0 \le B_0^{(в)},\ B_1^{(н)} \le B_1 \le B_1^{(в)},\ B_2^{(н)} \le B_2 \le B_2^{(в)},$$

где $\sigma_{Zвjv}$, $\sigma_{Zнjv}$ – плотность на кровле и подошве аппроксимирующего блока. Начальное приближение значений этих плотностей (при решении обратной задачи) принимается согласно обобщенным (нормальным) экспоненциальным зависимостям $\sigma(Z)$ [1], а предельные ограничения – в соответствии с шириной полосы $\{\sigma(Z)\pm\varepsilon_\sigma\}$. Величины $\sigma_{Zвjv}$ и $\sigma_{Zнjv}$ связаны с σ_{jv} и $\Delta\sigma_{jv}$ соотношениями

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{Zвjv} &= \sigma_{jv} + Z_в\Delta\sigma_{jv}\\ \sigma_{Zнjv} &= \sigma_{jv} + Z_н\Delta\sigma_{jv}\end{aligned}\right\},$$

или в матричной форме

$$\begin{pmatrix}\sigma_{Zвjv}\\ \sigma_{Zнjv}\end{pmatrix} = M\begin{pmatrix}\sigma_{jv}\\ \Delta\sigma_{jv}\end{pmatrix}.$$

Тогда

$$(A'_{0ijv}, A'_{1ijv}) = (A_{0ijv}, A_{1ijv})M^{-1},$$

где M^{-1} – матрица, обратная M.

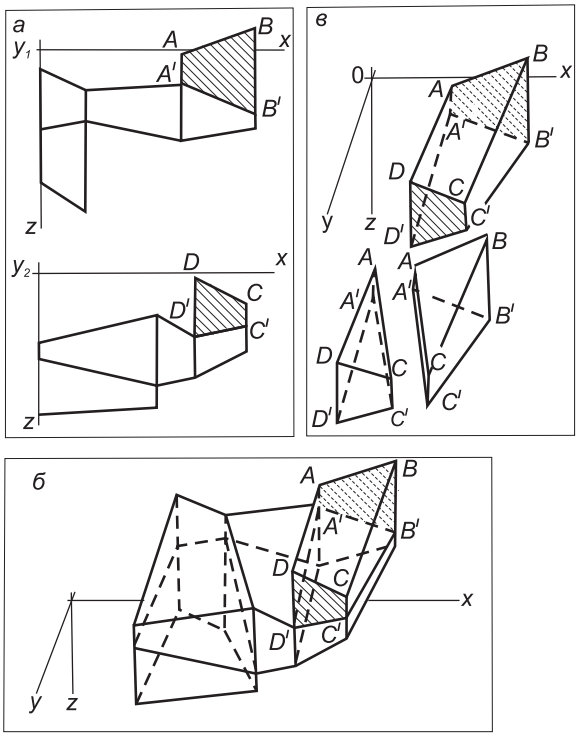


Рис. 2. *Плотностная параметризация при объемном (трехмерном) моделировании блоково-градиентно-слоистых сред: а) исходное описание вертикальными сечениями; б) описание аппроксимирующими блоками; в) аппроксимирующий блок и технологические элементы*

Задача определения σ_{Zb}, σ_{Zn}, B_0, B_1, B_2 сводится к задаче квадратичного программирования [7]:

$$f(x) = \left|\left| Ax - b \right|\right|^2 + \alpha \left|\left| x - x_0 \right|\right|^2 \le \varepsilon_b; \qquad (5)$$

$$x^{(\text{i})} \le x \le x^{(\text{â})}, \qquad (6)$$

где A – линейный оператор, характеризующий геометрию сейсмических границ, принятых за плотностные; b – поле, наблюденное с ошибкой $\pm\varepsilon_b$ в точках сети; x, x_0 – искомые и априорные (начальные приближения) неизвестных; α – параметр регуляризации.

Для решения задачи (5, 6) применен метод сопряженных градиентов, выполненный в виде итерационного процесса [10].

Решение задачи на квазиреальной модели

Основой для конструирования модели изучаемой среды послужили структурные схемы сейсмических горизонтов по кровле окобыкайских (ok) и дагинских (dg) отложений Западно-Татамской структуры [11], находящейся в Нышско-Тымском прогибе Сахалина. На основе структурных схем построены 8 глубинных сечений (по типу рис. 2, *а*). Затем пространство между вертикальными срезами структуры автоматически заполнено 216 аппроксимирующими блоками (по типу рис. 2, *б*). Ошибка аппроксимации сейсмических горизонтов составила не более ±20 м. Плотностям блоков приписаны нормальные значения согласно экспоненциальным зависимостям $\sigma(Z)$ [1] для отложений:

- дагинских

$$\sigma(Z) = 2,69 - 0,28\exp(-0,24Z);$$

- окобыкайских

$$\sigma(Z) = 2,70 - 0,38\exp(-0,28Z);$$

- нутовских

$$\sigma(Z) = 2,70 - 0,49\exp(-0,26Z).$$

На нормальное распределение значений плотности блоков наложен «геологический шум» ±0,02 г/см^3. В пространство нефтегазоносных окобыкайских отложений внесено разуплотнение (0,08...0,10) г/см^3, имитирующее высокопористую литофацию (рис. 3).

Модель наблюденного поля получена решением прямой задачи от модели среды с последующим наложением «белого шума» ±0,07 мГл.

При решении обратной задачи начальное приближение плотности всех блоков, включая неоднородность, принималось в соответствии с нормальными зависимостями $\sigma(Z)$, а предельные ограничения на плотности – ε_σ=±0,15 г/см^3 (1-й слой, нутовские отложения, nt), ε_σ=±0,10 г/см^3 (2-й слой, ok) и ε_σ=±0,06 г/см^3 (3-й слой, dg). Характеристика априорной модели среды (начального приближения) приведена в табл. 1 (последняя строка).

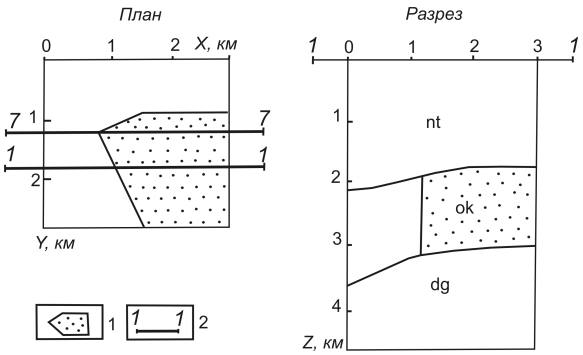


Рис. 3. *Иллюстрация задачи на квазиреальной модели (размещение высокопористой литофациальной неоднородности в нефтегазоносных отложениях ok): 1) область уменьшения плотности на 0,08...0,10 г/см^3; 2) профили, по которым выполнено сопоставление результатов трехмерного и двухмерного моделирования*

Результаты решений приведены в табл. 1 и на рис. 4. Когда задача решается по точному полю, увеличение числа итераций сопровождается монотонным уменьшением ошибки восстановления распределения плотности (табл. 1, варианты 1 и 2). Алгоритмическое [10] объединение отдельных блоков в достаточно крупные группы резко уменьшает ошибку восстановления плотности (табл. 1, вариант 3).

Таблица 1. *Результаты решения задачи на квазиреальной модели*

Вариант решения	Ошибка восстановления плотности, г/см³					Аномальность неоднородности, г/см³	Невязка поля, мГл, на модели		Примечание
	Неоднородность	1-й слой	2-й слой	3-й слой	Вся среда		Априорной	Расчетной	
По точному полю									
1	0,04	0,00	0,02	0,02	0,02	−0,06	−0,24	±0,00	100 итераций
2	0,04	0,00	0,02	0,01	0,01	−0,07	−0,24	±0,00	160 итераций
3	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	−0,08	−0,24	±0,00	100 итераций, объединение блоков в группы
По полю с помехой ±0,07 мГл									
4	0,07	0,01	0,04	0,02	0,03	−0,03	−0,26	±0,06	22 итерации
5	0,04	0,01	0,05	0,01	0,03	−0,06	−0,26	±0,06	216 итераций
6	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02	−0,04	−0,26	±0,06	22 итерации, объединение блоков в группы
По полю с помехой ±0,07 мГл при задании геометрии сейсмического слоя с ошибкой									
7	0,06	0,01	0,04	0,02	0,02	−0,03	−0,21	±0,06	Кровля опущена на 50 м
8	0,06	0,01	0,04	0,02	0,02	−0,03	−0,20	±0,06	Кровля и подошва опущены на 50 м
9	0,11	0,01	0,06	0,03	0,03	+0,02	+0,34	±0,08	Кровля опущена на 500 м
При ошибке априорного задания плотности, г/см³									
	0,09	0,02	0,05	0,01	0,02	0,00			

Когда решается задача (без объединения в группы) по полю, имитирующему высокоточные гравиметрические наблюдения (табл. 1, вариант 4), оконтуривание неоднородности в пространстве выполняется неуверенно (рис. 4). Принудительное увеличение числа итераций (табл. 1, вариант 5) формально значительно уменьшает ошибку восстановления плотности неоднородности (с 0,07 до 0,04 г/см³), однако по существу (рис. 4) решение ухудшается. Объединение блоков в группы (табл. 1, вариант 6) приводит к лучшему результату, рис. 4.

На рис. 4 не иллюстрируется 1-й слой (nt), так как во всех случаях ошибка восстановления плотности его блоков не превышает ±0,01 г/см³.

В случае, когда в модель среды неоднородность (разуплотнение) не вносится, при решении обратной задачи гравиметрии ни протяженные, ни локальные аномалии плотности не наблюдаются.

Варианты 7–9 (табл. 1) – это решения, когда сейсмическая информация (геометрия плотностных контактов) задана со значительной ошибкой. Ошибка задания геометрии (гипсометрии) сейсмического слоя может приводить к частичному перераспределению неоднородности в нижележащий слой (табл. 1, варианты 7 и 8). Задание положения кровли нефтегазоносных отложений (ok) с ошибкой +500 м приводит при решении обратной задачи гравиметрии к полному «выметанию» неоднородности из слоя (табл. 1, вариант 9).

Сопоставление результатов трехмерного и двухмерного моделирования. На профилях 1–1 и 7–7 (рис. 3) решена задача и средствами двумерного моделирования. В алгоритме двумерного моделирования реализован плоский вариант аппроксимирующего блока – трапеция с вертикальными боковыми сторонами (по типу рис. 2, *а*), а формулировка задачи повторяет формулировку (5, 6). Для решения задачи применен тот же итерационный процесс [10].

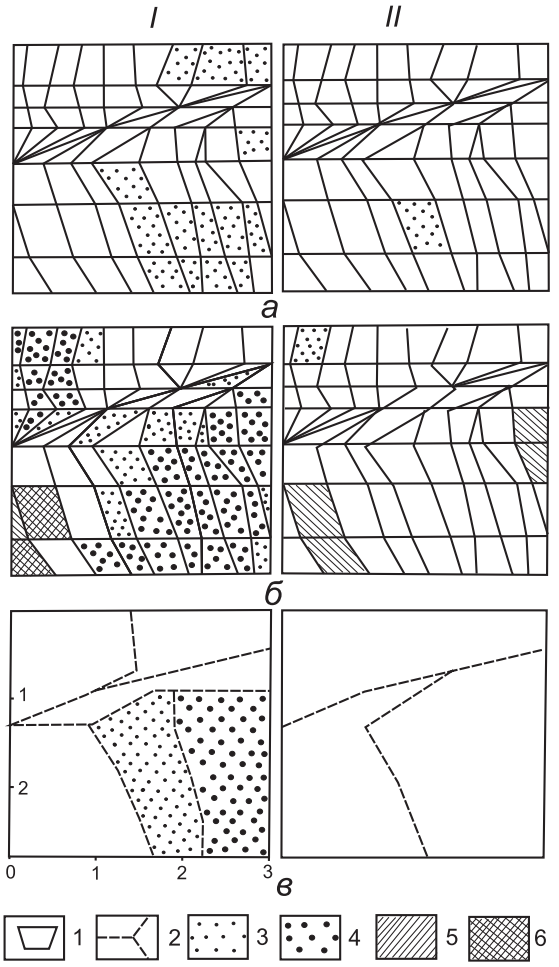


Рис. 4. *Результаты решения задачи на квазиреальной модели. Горизонтальные срезы среды: I – 2-й слой (ok); II – 3-й слой (dg). Варианты моделирования: а – 4; б – 5; в – 6. 1) аппроксимирующие блоки; 2) объединение блоков в группы; разуплотнения (3, 4) и уплотнения (5, 6) аппроксимирующих блоков более чем на 0,03 и 0,05 г/см³, соответственно*

На рис. 5 сопоставляются результаты восстановления плотности литофациальной неоднородности, полученные в сечении профиля 1 – 1 при трехмерном и двухмерном моделировании. Задачи решались по точному «наблюденному» полю (от среды с *трехмерными* объектами), чтобы в «чистом» виде оценить возможные дефекты двумерного моделирования.

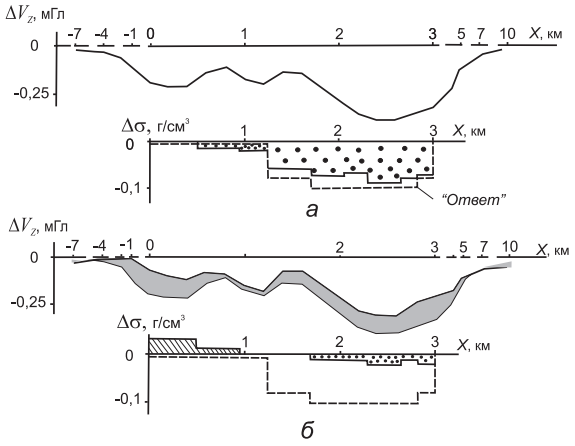


Рис. 5. *Сопоставление результатов трех- и двухмерного моделирования на квазиреальном объекте: а) трехмерное; б) двухмерное. ΔV_Z – аномальное поле – разность полей «наблюденного» и обусловленного моделью среды первого приближения; $\Delta\sigma$ – аномалия плотности, проявившаяся во 2-м слое при решении обратной задачи гравиметрии. Штриховой линией показано истинное распределение аномальной плотности («ответ»). Темной полосой показана разность аномальных полей при трех- и двухмерном моделировании*

Таким образом, мы получили количественные оценки (рис. 5), позволяющие констатировать, что двухмерное моделирование если и может дать информацию об искомой неоднородности в разрезе, то только об ее наличии. Но для этого необходимо очень точное проложение интерпретационного профиля над эпицентром неоднородности (рис. 3, профиль 1–1).

Если профиль заметно отклоняется от эпицентра неоднородности (рис. 3, профиль 7–7), то объект невозможно не только оконтурить, но и определить его наличие. В этом случае график ΔV_Z флуктуирует (±0,20 мГл) у нулевого уровня.

Интерпретация данных высокоточной гравиразведки на Верхненышском газоконденсатном месторождении

Основой для геометрической параметризации изучаемой среды послужили структурные схемы сейсмогоризонтов по кровле окобыкайских отложений – УОСГ-I и кровле дагинских отложений – УОСГ-II [11]. На основе структурных схем отстроены 12 глубинных сечений. Затем, пространство между вертикальными срезами структур было заполнено 492 аппроксимирующими блоками. Для повышения устойчивости решения обратной задачи гравиметрии аппроксимирующие блоки объединены (в пределах каждого слоя) в 62 группы. Априорным плотностям аппроксимирующих блоков приписывались нормальные значения $\sigma(Z)$ [1], фактическая дискретизация распределения плотности по латерали составила в среднем 400...500 м.

В качестве наблюденного поля послужили результаты высокоточной гравиметрической съемки – ±0,10 мГл. При моделировании сеть расчетных точек задавалась с шагом 500 м со сгущением непосредственно над локальными структурами.

Задача моделирования формулируется следующим образом. Принимая за начальное приближение распределения плотности нутовских, окобыкайских и дагинских отложений их нормальные закономерности $\sigma(Z)$, необходимо найти такое вертикальное и латеральное распределение плотности в пространстве сейсмических слоев, которое бы удовлетворяло наблюденному полю с «невязкой» ±0,10 мГл. При этом расчетные значения плотностей блоков должны находиться в пределах «полос» $\{\sigma(Z)\pm\varepsilon_\sigma\}$.

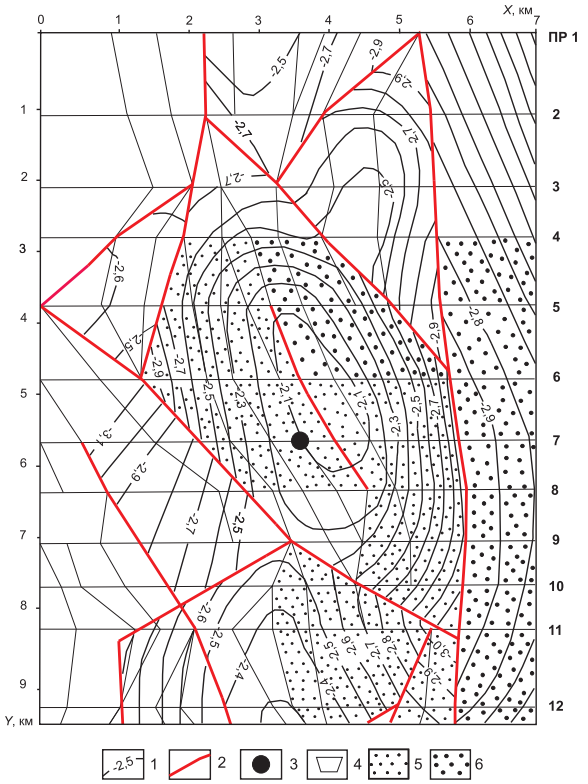


Рис. 6. *Горизонтальный срез Верхне-Нышской структуры по верхней части окобыкайских отложений (приведены изогипсы по кровле окобыкайских отложений): 1) изогипсы УОСГ, км; 2) разрывные нарушения; 3) скважина Верхне-Нышская 1; 4) горизонтальные сечения аппроксимирующих блоков при объемном моделировании; выявленные разуплотнения (5, 6) более чем на 0,03 и 0,05 г/см³, соответственно*

Результаты решения задачи приведены на рис. 6–8. Точность подбора поля ±0,10 мГл. Рассчитанное распределение плотности находится в пределах заданных «полос».

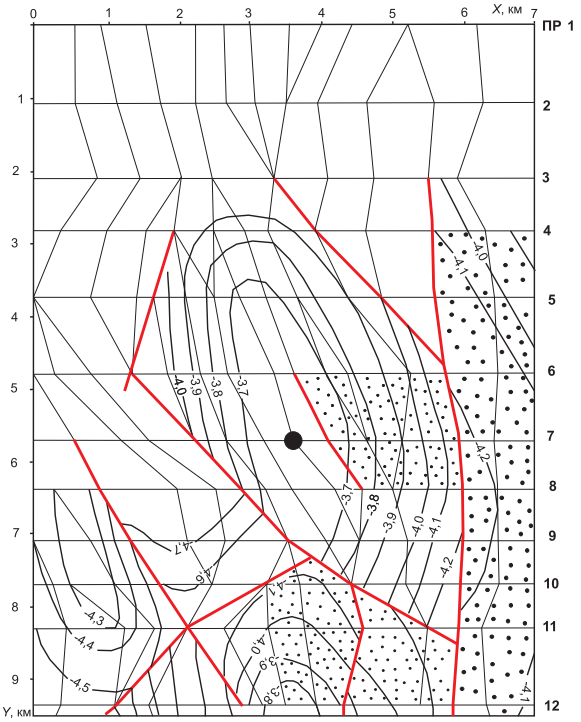


Рис. 7. *Горизонтальный срез Верхне-Нышской структуры по нижней части окобыкайских отложений (приведены изогипсы по кровле дагинских отложений). Условные обозначения те же, что на рис. 6*

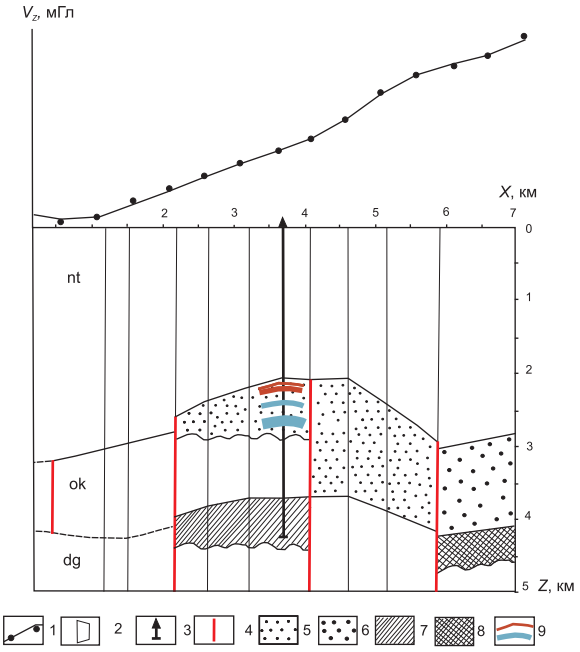


Рис. 8. *Вертикальный срез Верхне-Нышской структуры вдоль профиля 7: 1) наблюденное и расчетное поля; 2) вертикальные сечения аппроксимирующих блоков при объемном моделировании; 3) скважина Верхне-Нышская 1; 4) разрывные нарушения; выявленные разуплотнения (5, 6) и уплотнения (7, 8) более чем на 0,03 и 0,05 г/см^3, соответственно; 9) залежи газа и конденсата, водонасыщенные интервалы*

Результаты, рис. 6–8, нужно рассматривать с учетом приведенных выше результатов квазиреального моделирования: вероятная ошибка восстановления распределения плотности порядка ±0,02 г/см^3; контрастность выявленных разуплотнений в окобыкайских нефтегазоносных отложениях, вероятно, занижена по отношению к истинной в 1,5...2,0 раза.

Результаты геоплотностного моделирования удовлетворительно согласуются с комплексом геологических данных по площади работ, в том числе с результатами геофизических исследований (ГИС) и испытаний глубокой скважины Верхне-Нышская 1 (табл. 2).

Примечания: *1) результаты моделирования получены 1989 г.; 2) бурение скважины ВН-1 закончено и «Заключение» по результатам интерпретации материалов ГИС сделано в 1990 г. (Насырова, Чалая, 09.07.1990).*

Очевидны рекомендации по положению последующих скважин на опоискование окобыкайских отложений – на участках максимальных разуплотнений с учетом структурного фактора.

Таблица 2. *Скважина Верхне-Нышская 1. Сопоставление установленной нефтегазоносности окобыкайских, дагинских отложений и результатов геоплотностного моделирования*

Интервал испытаний (пласт), м	Характеристика по результатам ГИС		Характеристика по результатам испытаний		Плотностная характеристика по результатам моделирования
	Пористость, отн. ед.	Характер насыщения	Открытая пористость, отн. ед.	Газонасыщенность, отн. ед.	
2140...2152 (пласт I)	0,14...0, 15	Газонасыщенный	0,19	0,52	Разуплотнение более чем на 0,03 г/см^3
2163...2175 (пласты II, IIа, IIб)	0,16...0,24		0,22	0,63	
2342...2408	0,17...0,22	Водонасыщенный	Испытания не проводились		То же
2630...2900	0,15...0,20				
2900...4000	0,03...0,12	–			«Нормальная»
4000...4334	0,03...0,05	–			Уплотнение более чем на 0,03 г/см^3

Свойства структур земной коры и, в частности, объектов нефтегазовой геологии – вертикальный градиент плотности и трехмерность, как универсальные, установлены давно. Однако, при интерпретации данных детальной и высокоточной гравиразведки эти свойства, за редким исключением [12], не учитываются.

Выводы

1. Для выявления и картирования высокопористых литофаций нефтегазоносных комплексов в пределах ловушек углеводородов предложен способ объемного моделирования плотности сейсмического тела.
2. В качестве интерпретационной принята гравитационная модель трехмерной блоково-градиентно-слоистой среды. Задача моделирования формализуется как задача квадратичного программирования.
3. Применение модели на универсальном по сложности квазиреальном объекте показало возможность положительного решения – обнаружения и оконтуривания разуплотненной (высокопористой) литофации.
4. Полученные оценки точности восстановления распределения плотности (порядка $\pm 0{,}02$ г/см^3) можно использовать для оценки вероятных ошибок решения обратной задачи в реальных условиях, в качестве количественного критерия выделения и оконтуривания областей разуплотнения – высокопористых литофаций.
5. Получены оценки аномальных эффектов от искомых разуплотнений в нефтегазоносных отложениях, уровень которых (~0,20 мГл) предполагает использование для решения задачи высокоточных гравиметрических наблюдений.
6. Получены количественные оценки значительных, как правило, неприемлемых ошибок решения задачи, если пользоваться средствами двумерного моделирования.
7. На основании результатов объемного (трехмерного) геоплотностного моделирования на месторождении могут быть даны рекомендации по заложению поисково-разведочных скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев В.И., Косыгин В.Ю., Лобова Г.А., Пятаков Ю.В. Интерпретация данных высокоточной гравиразведки. Вертикальный градиент плотности // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 83–90.
2. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 61. Горючие ископаемые. Т. VII. Восточно-Сибирский и Дальневосточный регионы. – М.: Росгеолфонд, 1999. – 219 с.
3. Исаев В.И. Интерпретация данных гравиметрии и геотермии при прогнозировании и поисках нефти и газа. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 172 с.
4. Новоселицкий В.М., Килейко Е.С., Серов В.К., Неволин Л.П. Изучение латеральной изменчивости физических параметров осадочных толщ и зональности геофизических полей на локальных структурах // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. – М.: ВИЭМС, 1980. – 58 с.
5. Романовский Н.П. Петрофизика гранитоидных рудно-магматических систем Тихоокеанского пояса. – М.: Наука, 1987. – 190 с.
6. Геофизические методы при разведке недр / под ред. Л.Я. Ерофеева, В.И. Исаева. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 267 с.
7. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – Киев: Наукова думка, 1978. – 228 с.
8. Голиздра Г.Я. Основные методы решения прямой задачи гравиразведки на ЭВМ // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. – М.: ВИЭМС, 1977. – 98 с.
9. Исаев В.И., Пятаков Ю.В. Решение прямой задачи гравиметрии для трехмерных блоково-градиентно-слоистых сред // Геофизический журнал. – 1990. – Т. 12. – № 3. – С. 72–79.
10. Исаев В.И., Пятаков Ю.В., Рузич Н.М. и др. Объемное моделирование в гравитационном поле плотности сейсмического тела // Интерпретация гравитационных и магнитных полей / Отв. ред. В.Н. Страхов, В.И. Старостенко. – Киев: Наукова думка, 1992. – 248 с.
11. Исаев В.И., Шпакова Н.В., Исаева О.С. Распределенный банк геолого-геофизических данных по нефти и газу Сахалинской области // Тихоокеанская геология. – 2003. – Т. 22. – № 2. – С. 81–91.
12. Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Матер. 38-й сессии Междунар. научного семинара им. Д.Г. Успенского, Пермь, 24–28 января 2011 г. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – 319 с.

Поступила 14.06.2011 г.

УДК 550.831.01

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ГРАВИМЕТРИИ

Ю.В. Пятаков, В.И. Исаев*

Воронежский государственный университет инженерных технологий
*Томский политехнический университет
E-mail: pyatakovjv@mail.ru

Приведен аналитический обзор методов решения прямых задач гравиметрии. Аппроксимация распределения плотности выполняется набором элементарных тел, имеющих геометрическую форму и заданный закон изменения плотности. Сформулированы требования к оптимальным алгоритмам решения прямых задач и даны рекомендации по их реализации.

Ключевые слова:
Прямые задачи гравиметрии, элементарные тела, закон изменения плотности, оптимальные алгоритмы.

Key words:
Direct gravity problem, the elementary body, the variation of density, optimal algorithms.

Введение

В проблеме развития теории интерпретации геофизических полей важнейшее место принадлежит совершенствованию и развитию методов решения прямых задач.

Решение прямых задач – это определение соответствующих элементов поля по заданным пространственным распределениям физических параметров, характеризующих определенные свойства изучаемой геологической среды (плотность, намагниченность, теплопроводность и др.).

Использование этих методов позволяет учесть влияния геологических тел с известными петроплотностными и геометрическими параметрами, осуществлять последующий морфологический анализ вычисленных компонент полей, а также решать обратные задачи с использованием методов моделирования.

Задание источников поля должно осуществляться исходя из ряда требований. С одной стороны, оно должно обладать хорошими аппроксимационными свойствами, позволяющими наиболее адекватно описывать строение реальных геологических тел и структур. С другой стороны, оно должно обеспечивать высокую скорость вычислений при требуемой точности решения прямой задачи. Требование быстродействия и точности алгоритмов решения прямых задач приобретает первостепенное значение, поскольку их последовательное многократное решение лежит в основе одного из ведущих методов количественной интерпретации – метода подбора. Метод автоматизированного подбора, несмотря на использование регуляризованных алгоритмов, может характеризоваться неустойчивостью результатов, что влечет за собой повышенные требования к точности исходных данных и погрешностям вычислений.

В настоящей статье рассматриваются постановки и методы решения прямых задач гравиметрии для типовых аппроксимирующих элементов, а также ряд аспектов, связанных с построением оптимальных алгоритмов их численной реализации.

Постановка прямых задач

Двухмерные задачи гравиметрии. В качестве типового аппроксимирующего элемента в двухмерных задачах удобно использовать трапеции с вертикальными боковыми сторонами и произвольно ориентированными (прямолинейными) верхним и нижним основаниями (рис. 1), а также трапеции, верхнее и нижнее основания которых представлены сегментами парабол (рис. 2).

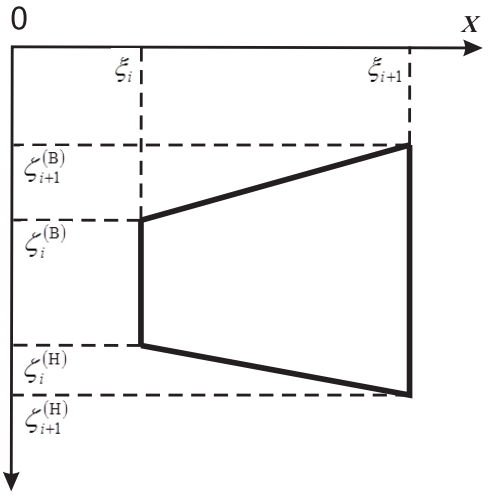


Рис. 1. *Трапеция с вертикальными боковыми сторонами и произвольно расположенными прямолинейными верхним (В) и нижним (Н) основаниями. Условные обозначения и пояснения здесь и далее в тексте*

Под прямой задачей гравиметрии для рассматриваемых тел понимается задача определения вертикальной составляющей гравитационного потенциала, выражение для которой имеет вид:

$$V_z(x,z) = 2f \iint_S \rho(\xi,\zeta)\frac{(\zeta - z)}{(\xi - x)^2 + (\zeta - z)^2}\,d\xi\,d\zeta,$$

где x и z – координаты точки расчета; f – константа гравитации; ξ и ζ – переменные интегрирования; S – область интегрирования; $\rho(\xi,\zeta)$ – распределение плотности.

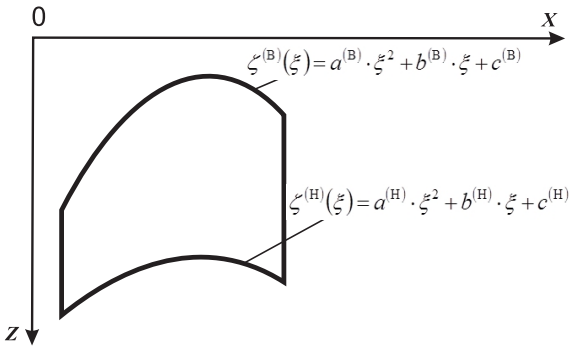


Рис. 2. *Трапеция с параболическими верхним и нижним основаниями*

Часто отдельные геологические образования полагают однородными по плотности (т. е. $\rho(\xi,\zeta)$=const), а весь моделируемый объем среды представляется набором кусочно-однородных, различающихся по плотности аппроксимирующих тел.

Вместе с тем, известно, что плотность одновозрастных осадочных пород, вследствие постседиментационных процессов, увеличивается с глубиной. Зависимость плотности осадков от глубины наиболее адекватно описывается зависимостями вида [1, 2]:

$$\rho(\varsigma)=B_0-B_1\exp(-B_2\zeta), \qquad (1)$$

где B_0 – минеральная (максимальная) плотность отложений; B_1 – характеризует плотность неуплотненных осадков, а B_2 – интенсивность воздействия фактора геологического времени.

В случае, когда интервалы изменения глубин отдельных геоблоков невелики, рационально вместо экспоненциального закона (1) использовать его линейную аппроксимацию:

$$\rho(\varsigma)=\rho_0+k\zeta, \qquad (2)$$

где ρ_0 – значение плотности на уровне ζ=0; k – вертикальный градиент плотности.

Для трапеции на рис. 1 можно полагать, что плотность меняется вдоль вертикального направления по (1) или (2) законам, а для трапеции, представленной на рис. 2 – плотность меняется по закону (2).

Трёхмерные задачи гравиметрии. При решении трехмерных задач в качестве аппроксимирующих тел удобно использовать вертикальные треугольные призмы (рис. 3) с произвольными верхним и нижним основаниями. Плотность в теле может меняться вдоль вертикальной координаты по экспоненциальному (1) или линейному (2) законам.

Выражение для вертикальной составляющей гравитационного потенциала имеет вид:

$$V_z(x,y,z)=f\iiint_D\rho(\zeta)\frac{(\zeta-z)}{P^3}d\xi\,d\eta\,d\zeta,$$

где x, y, z – координаты точки расчета; ξ, η, ζ – переменные интегрирования; D – вертикальная треугольная призма (рис. 3); $\rho(\zeta)$ – распределение плотности;

$$P=\sqrt{(\xi-x)^2+(\eta-y)^2+(\zeta-z)^2}.$$

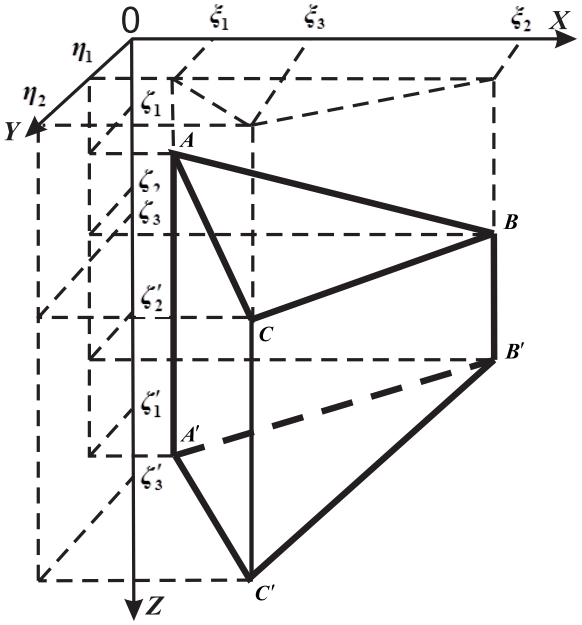


Рис. 3. *Вертикальная треугольная призма*

При построении моделей крупных геологических объектов, когда необходимо учитывать сферичность Земли, в качестве элементов аппроксимации удобно использовать сферические аппроксимирующие тела [3–5]: многогранник (рис. 4) и треугольная призма (рис. 5).

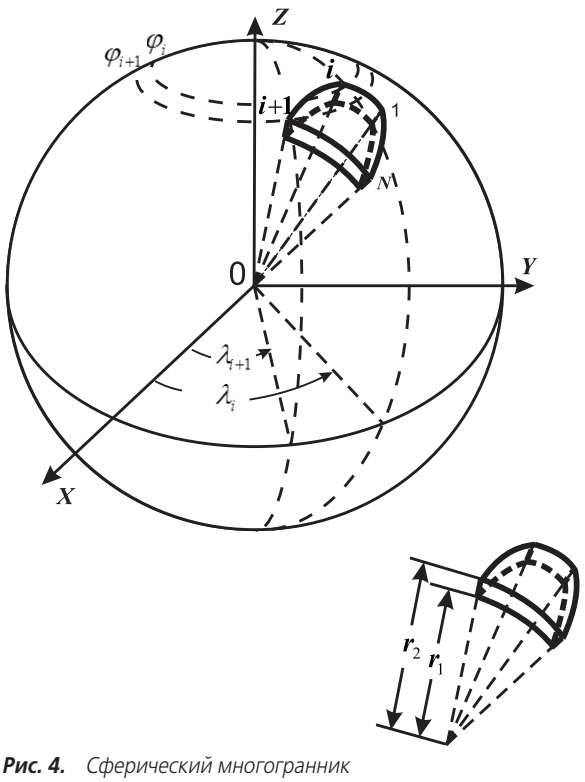


Рис. 4. *Сферический многогранник*

Определение сферического многогранника. В сферической системе координат $\Sigma_{СФ}(0;r;\varphi;\lambda)$ выделяется тело (рис. 4), имеющее $2\times N$ вершин λ, φ. N вершин тела расположены на сфере радиуса r_2 и имеют координаты r_2, φ_i, λ_i; i=1,2,..., N, а остальные N вершин тела расположены на сфере радиуса r_1 ($r_1<r_2$) и имеют координаты r_1, φ_i, λ_i; i=1,2,...,N.

Каждая боковая грань тела лежит в плоскости большого круга, проведенного через смежные вершины r_2, φ_i, λ_i; r_2, φ_{i+1}, λ_{i+1} и начало системы координат.

Верхняя и нижняя грани тела образованы соответствующими сегментами сфер радиусов r_2 и r_1 – сферическими многоугольниками. Каждая сторона (ребро) верхней (нижней) грани представляет собой дугу большого круга, соединяющую смежные вершины r_2, φ_i, λ_i; r_2, φ_{i+1}, λ_{i+1} и r_1, φ_i, λ_i; r_1, φ_{i+1}, λ_{i+1}. Боковые ребра тела представлены отрезками прямых, соединяющих вершины с координатами r_1, φ_i, λ_i и r_2, φ_i, λ_i. Определенное таким образом тело будем называть сферическим многогранником.

Определение сферической треугольной призмы. В сферической системе координат $\Sigma_{СФ}(0;r;\varphi;\lambda)$ выделяется тело (рис. 5), имеющее вершины с координатами $(r_1^{в},\varphi_1,\lambda_1)$, $(r_1^{н},\varphi_1,\lambda_1)$, $(r_2^{в},\varphi_2,\lambda_2)$, $(r_2^{н},\varphi_2,\lambda_2)$, $(r_3^{в},\varphi_3,\lambda_3)$, $(r_3^{н},\varphi_3,\lambda_3)$. Каждая боковая грань тела лежит в плоскости большого круга, проведенного через смежные вершины $(r_i^{в},\varphi_i,\lambda_i)$; $(r_{i+1}^{в},\varphi_{i+1},\lambda_{i+1})$ и начало системы координат.

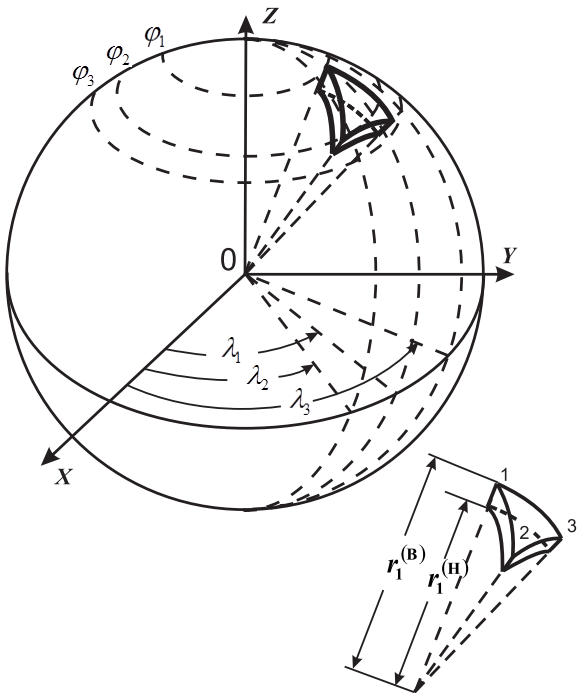


Рис. 5. *Сферическая треугольная призма*

Уравнение для верхней грани имеет вид:

$$r^{(в)}(\varphi,\lambda)=a^{(в)}\varphi+b^{(в)}\lambda+c^{(в)}.$$

Соответственно нижняя грань описывается уравнением:

$$r^{(н)}(\varphi,\lambda)=a^{(н)}\varphi+b^{(н)}\lambda+c^{(н)}.$$

Плотность выделенных сферических тел полагается постоянной.

Под прямой задачей для рассматриваемых сферических тел понимается определение радиальной составляющей гравитационного потенциала:

$$V_r(R,\varphi_0,\lambda_0)=$$
$$=f\rho\iiint_D(R-r\cos\omega)P^{-3}r^2\sin\varphi dr d\varphi d\lambda. \qquad (3)$$

Здесь R, φ_0, λ_0 – координаты точки расчета поля в сферической системе координат; r, φ, λ – переменные интегрирования; ρ – плотность сферического тела D; ω – угол при центре сферы между направлениями на точки R, φ_0, λ_0) и r, φ, λ, соответственно;

$$P^2=R^2+r^2-2Rr\cos\omega,$$
$$\cos\omega=\cos\varphi_0\cos\varphi+\sin\varphi_0\sin\varphi\cos(\lambda_0-\lambda).$$

Алгоритмы решения прямых задач гравиметрии

Создание эффективных методов решения прямых задач – одна из фундаментальных задач теории интерпретации гравитационных полей и ее решению посвящено множество работ.

Идея аппроксимации геологической среды с помощью трапеций с произвольными верхним и нижним основаниями принадлежит Г.Я. Голиздре [6]. В.И. Старостенко и А.Н. Заворотько [7] приводят аналитические выражения для компонент поля от трапеции с постоянной плотностью.

Алгоритмы решения прямых задач для тел с экспоненциальной плотностью можно подразделить на приближенные и точные (аналитические). Приближенные алгоритмы приведены в работах [8–10]. Т.В. Балк с соавторами [8] гравитационный эффект определили путем аппроксимации тела набором полосок, плотность в пределах каждой полоски полагая постоянной и равной значению экспоненты (1) в центре полоски, а гравитационный эффект вычислили как сумму гравитационных эффектов полосок. В [9, 10] тело также разбивалось системой полосок. R. Murthy и B. Rao [9] использовали линейную аппроксимацию экспоненты, позже B. Rao [10] – квадратическую.

В работах [11–13] получены аналитические решения для двухмерных тел (многоугольников [11] и трапеций [12, 13]) с линейной и экспоненциальной плотностью. Ю.В. Пятаковым [12, 13] приведены результаты тестирования и дан анализ полученных выражений в особых точках. Аналитическое решение [12] позволило в явном виде определить выражения для частных производных матрицы Якоби при решения обратной нелинейной задачи. В.И. Старостенко и его учениками [14] выполнена математическая постановка и дано решение обратной нелинейной задачи гравиметрии для сред с экспоненциальной зависимостью плотность-глубина.

В.Н. Страховым [11] получено аналитическое решение прямой задачи гравиметрии для многоугольников с криволинейными сторонами, частным случаем которых является параболическая трапеция (рис. 2).

Аналитические решения прямой трехмерной задачи для многогранников и призм с линейной, а также полиномиальной плотностью приводились в работах [15–17]. Ю.В. Пятаковым и В.И. Исаевым [18] получено и исследовано решение прямой трехмерной задачи для произвольного многогранника с экспоненциально изменяющейся с глубиной плотностью.

Алгоритмы решения прямых задач гравиметрии для сферических тел приведены в работах [3–5]. В.И. Старостенко и А.Г. Манукяном [3] получено решение задачи для прямоугольного параллелепипеда, В.Ю. Косыгиным с соавторами [4] – для сферического многогранника, а В.И. Старостенко и О.В. Легостаевой [5] рассмотрен алгоритм решения задачи для сферической призмы с произвольными верхним и нижним основаниями. Интегралы (3) для данных аппроксимирующих тел не выражаются в аналитическом виде. Для их приближенного вычисления использованы квадратурные формулы Гаусса–Лежандра.

Понятие оптимальных алгоритмов решения прямых задач

Прямые задачи гравиметрии являются классическими и восходят к XIX в. [19]. Для некоторых тел выведены десятки принципиально идентичных, но различающихся по виду вычислительных формул. При этом, одни из формул оказываются чересчур громоздкими и неудобными для программирования на ЭВМ, другие позволяют вычислять поле не во всех внешних по отношению к телу точках, третьи – более универсальны, однако требуют при реализации повышенной точности представления чисел.

В.Н. Страховым [20] были сформулированы основные требования к алгоритмам решения прямых задач: *точность*, *быстродействие* и *устойчивость*. Результаты вычислительных экспериментов [17] позволяют уверенно конкретизировать суть этих требований.

Суть первого требования состоит в том, что вычислительный алгоритм должен обеспечивать изначально заданную ***точность*** решения. Поскольку любые вычисления происходят с конечным числом значащих цифр, то существуют ошибки округления. Поэтому, результат, полученный даже по точной аналитической формуле, будет содержать некоторые ошибки, т. е. будет приближенным. В некоторых случаях такие ошибки могут достигать значительных величин и тем самым приводить к неверным результатам. Чтобы избежать этого, необходим анализ ошибок округления и анализ используемой численной схемы.

Требование ***быстродействия*** предполагает, что время решения прямой задачи с заданной точностью должно быть минимальным. Несомненно, что максимальную точность и быстродействие удаётся получить в тех случаях, когда для элементов полей оказывается возможным получить явные аналитические выражения в элементарных трансцендентных функциях. Таким образом, проблемы аналитического и точного численного решения прямых задач оказываются взаимосвязанными.

У термина ***устойчивость*** для прямой задачи своя специфика. Смысл его раскрывается следующим образом. Существует множество точек пространства, в которых расчеты по аналитическим выражениям без их предварительного анализа невозможны. Вычисляемые величины, входящие в выражения для решения, могут обращаться в бесконечность или претерпевать разрыв, вместе с тем результат должен быть непрерывной функцией. В точках, близких к указанному, так называемому множеству устранимых особых точек, точность вычислений может падать.

Для трехмерных тел в виде однородных многогранников множеством устранимых особых точек является его остов (совокупность ребер и вершин). Аналитическое решение прямых задач гравиметрии для данных тел может быть представлено совокупностью элементарных и трансцендентных функций (логарифмическими и обратными тригонометрическими функциями). Устранимые особенности порождаются логарифмическими функциями, поэтому в работах [19, 21] даны представления их аргументов, позволяющие избежать вычислительной неустойчивости, возникающей при расчетах. В этих же работах рекомендовано использование в качестве обратных тригонометрических функций – функции arctg и разработана рациональная процедура, обеспечивающая повышение быстродействия вычислительных алгоритмов.

Для сферических трехмерных тел вычислительный алгоритм решения прямой задачи целесообразно строить с использованием квадратурных формул Гаусса–Лежандра, которые обладают наивысшей степенью точности при заданном количестве узлов интегрирования. Для сферического многогранника (рис. 4) интегрирование выражения (3) *предлагаем выполнить по двум переменным r, φ, что позволяет строить эффективные в плане быстродействия и устойчивости алгоритмы*. Сферическая треугольная призма (рис. 5) обладает более универсальными аппроксимационными свойствами (верхняя и нижняя грани этого тела произвольны). Однако аналитическое интегрирование (3) в этом случае можно выполнить только по одной переменной и для численного решения задачи приходится строить кубатурный вычислительный процесс. Для улучшения сходимости вычислительного процесса в точках, лежащих в непосредственной близости к аппроксимирующему телу, *предлагаем использовать метод аддитивного выделения особенностей*.

Особенности реализации алгоритмов решений прямых задач

Использование базовых операций FPU. В состав процессоров обычно входит блок операций с плавающей точкой (FPU – Floating-Point Unit), реализующий программно-аппаратную обработку вещественных чисел. Эти устройства в десятки и сотни раз увеличивают скорость выполнения арифметических операций с числами с плавающей точкой. Кроме того, они содержат значения ряда констант и могут выполнять трансцендентные операции.

Оптимальную программную реализацию алгоритмов решения прямых задач *предлагаем* выполнять с использованием средств языка Ассемблер, поскольку он позволяет осуществить наиболее эффективное применение необходимых базовых команд FPU [22].

Для вычисления обратных тригонометрических функций в алгоритмах *предлагаем* использовать команду FPATAN [23]. Данная команда имеет два аргумента x и y и вычисляет значение функции arctg (x/y). Результат команды имеет тот же знак, что и операнд x. Время выполнения команды соответствует времени выполнения трех арифметических операций деления.

Для расчета логарифмических функций *предлагаем* использовать команду FYL2X, которая вычисляет выражение вида: $y\log_2(x)$. Пользуясь результатом выполнения этой команды, можно вычислить значение логарифмов по любому основанию.

Помимо операции FYL2X, в блоке FPU имеется команда FYL2XP1, вычисляющая выражение $y\log_2(x+1)$ при условии: $|x|<1-1/\sqrt{2}$. Команда FYL2XP1 обеспечивает высокую точность вычисления логарифмов, когда их аргументы находятся вблизи единицы. *В алгоритмах решения прямых задач* такая ситуация возникает в тех случаях, когда расчетная точка находится на больших удалениях от аппроксимирующего элемента и возможны потери точности общего решения из-за погрешности вычислений.

Использование технологий параллельного программирования. Расчетные схемы в задачах интерпретации с использованием алгоритмов решений прямых задач обычно организованы по типу вложенных циклических процедур – внешний цикл по точкам расчетной сети системы наблюдений, вложенные циклы – по аппроксимирующим элементам и т. д. При этом одна итерация цикла не зависит от результатов выполнения других итераций. Такие алгоритмические конструкции удобны для реализации в них стандарта OpenMP, позволяющего более полно использовать вычислительные ресурсы многоядерных процессоров [24].

Обсуждение и выводы

Если геологическая структура имеет существенную вытянутость, то можно допустить, что вблизи эпицентра компонента аномального поля, направленная вдоль простирания структуры, отсутствует. К таким структурам относятся ряд рудных и нефтяных объектов. Моделирование гравитационного поля в этом случае *целесообразно* выполнять с помощью двухмерных аппроксимирующих тел – трапеций.

Если наблюдения проводятся на поисковой площади с линейными размерами порядка десятков и первых сотен км, то направления нормалей к поверхности геоида можно считать практически одинаковыми. Измеренная гравитационная аномалия в этом случае будет представлять собой аномалию вертикальной составляющей гравитационного поля. Для моделирования таких объектов *целесообразно* использовать вертикальные треугольные призмы.

При решении региональных задач, когда изучаемые структуры имеют протяженность порядка тысячи километров и более, необходимо учитывать сферичность Земли и в качестве аппроксимирующих элементов использовать сферические тела. Сферический многогранник *целесообразно* использовать для интерпретации данных морских и спутниковых измерений, а сферическую треугольную призму – для данных наземной съемки.

К числу оптимальных алгоритмов, реализующих решение прямых задач для трехмерных тел в виде многогранников, следует отнести отмеченные в настоящей статье алгоритмы В.Н. Страхова. Для сферических тел оптимально использование схемы решения, данное в работах В.И. Старостенко.

Программную реализацию алгоритмов решения прямых задач *рекомендуем* осуществлять с учетом специфических особенностей архитектуры современных вычислительных средств и технологий программирования. В алгоритмах, реализующих квадратурные вычислительные процессы, *рекомендуем* использование методов аддитивного выделения особенностей, позволяющих обеспечить устойчивость и быстродействие численных методов.

Авторы статьи занимаются построением и компьютерной реализацией алгоритмов решения задач определения составляющих гравитационного, магнитного, температурного полей, а также распределения скоростей движения и напряжений неоднородных сред. Концептуально принимается, что теория решения трехмерных задач математической физики допускает *универсальное использование методов теории потенциалов и многомерных интегральных уравнений для построения алгоритмов эффективного численного решения прямых задач весьма разных по физическому смыслу.* Такой концептуальный подход и результаты его реализации будут приведены в следующей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев В.И., Косыгин В.Ю., Лобова Г.А., Пятаков Ю.В. Интерпретация данных высокоточной гравиразведки. Вертикальный градиент плотности // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 83–90.
2. Исаев В.И., Старостенко В.И. Оценка нефтегазоматеринского потенциала осадочных бассейнов Дальневосточного региона по данным гравиметрии и геотермии // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26. – № 2. – С.46–61.
3. Старостенко В.И., Манукян А.Г. Решение прямой задачи гравиметрии на шарообразной Земле // Физика Земли. – 1983. – № 12. – С. 34–50.
4. Kosygin V.Yu., Pyatakov Yu.V., Krasikov V.N. Direct Gravity Problem for a Spherical Polyhedron // Geology of Pacific Ocean. – 1997. – V. 13. – P. 857–868.
5. Старостенко В.И., Легостаева О.В. Прямая задача гравиметрии для неоднородной произвольно усеченной вертикальной прямоугольной призмы // Физика Земли. – 1998. – № 12. – С. 31–44.
6. Голиздра Г.Я. Решение прямой задачи гравиметрии для трехмерных масс // Материалы геофизических исследований на Украине. – Киев: Наукова думка, 1972. – С. 54–66.
7. Старостенко В.И., Заворотько А.Н. Методика и результаты применения регуляризующего алгоритма при решении обратной нелинейной задачи гравиметрии // Геофиз. сб. АН УССР. – 1976. – Вып. 71. – С. 29–40.
8. Балк Т.В., Новоселова М.Р., Балк П.И., Турутанов Е.Х. О точности определения нижней границы геологического объекта по гравиметрическим данным (на примере впадин Байкальской рифтовох зоны) // Физика Земли. – 1988. – № 3. – С. 81–86.
9. Murthy R., Rao B. Gravity anomalies of two-dimensional bodies of irregular cross-section with density contrast varying with depth // Geophysics. – 1979. – V. 44. – № 9. – P. 1525–1530.
10. Rao B. Modelling of sedimentary basins from gravity anomalies with variable density contrast // Geophysics. – 1986. – V. 84. – № 1. – P. 207–212.
11. Страхов В.Н. К теории логарифмического потенциала при переменной плотности возмущающих масс // Физика Земли. – 1975. – № 12. – С. 64–81.
12. Пятаков Ю.В. Решение прямой задачи гравиметрии для неоднородных сред // Геофизический журнал. – 1991. – Т. 13. – № 5. – С. 79–85.
13. Pyatakov Yu.V., Isaev V.I. Solution of an Inverse Linear 2-D Gravimetric Problem for Sedimentary Cross-Sections // Geophys. J. – 1997. – V. 16. – P. 393–406.
14. Старостенко В.И., Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Решение обратной задачи гравиметрии для контактов осадочных пород // Геофизический журнал. – 1993. – Т. 15. – № 1. – С. 62–71.
15. Миненко П.А. Моделирование подземных гравитационных аномалий в Кривбассе // Доклады АН УССР. Серия Б. – 1979. – № 9. – С. 704–709.
16. Кравцов Г.Г. Аналитическое представление внутреннего и внешнего полей притяжения тел с переменной плотностью, ограниченных поверхностями первого порядка // Теория и методика интерпретации гравимагнитных полей. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 105–112.
17. Исаев В.И., Пятаков Ю.В. Решение прямой задачи гравиметрии для трёхмерных блоково-градиентно-слоистых сред // Геофизический журнал. – 1990. – Т. 12. – № 3. – С. 72–79.
18. Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Решение прямой задачи гравиметрии для произвольного многогранника с экспоненциально изменяющейся с глубиной плотностью // Геофизический журнал. – 1995. – Т. 17. – № 6. – С. 40–50.
19. Страхов В.Н., Лапина М.И. Прямая и обратная задачи гравиметрии и магнитометрии для произвольных однородных многогранников // Теория и практика интерпретации гравитационных и магнитных полей в СССР. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 3–87.
20. Страхов В.Н. О проблеме решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии для материального стержня с полиноминальной плотностью // Геофизический журнал. – 1985. – Т. 7. – № 5. – С. 3–9.
21. Страхов В.Н., Лапина М.Н. Прямые задачи гравиметрии и магнитометрии для однородных многогранников // Геофизический журнал. – 1986. – Т. 8. – № 6. – С. 20–31.
22. Магда Ю.С. Использование ассемблера для оптимизации программ на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.
23. Григорьев В.Л. Микропроцессор i486. Книги 2,3,4. – М.: ГРАНАЛ, 1993. – 382 с.
24. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 77 с.

Поступила 13.10. 2011 г.

УДК 681.584.311

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

С.К. Прищепов, К.И. Власкин

Уфимский государственный авиационный технический университет
E-mail: ugatu_iit@mail.ru

Определены условия задачи поиска скрытых ферромагнитных предметов на фоне действия нормального магнитного поля Земли. Рассмотрены функциональные возможности магнитометров, предназначенных для обнаружения магнитных аномалий. Представлен комплексный гравитационный магнитометрический прибор для определения местоположения локальных магнитных объектов, скрытых в неферромагнитных укрывающих средах.

Ключевые слова:
Однородное магнитное поле, магнитная аномалия, диаграмма направленности феррозонда, жидкостной маятниковый коммутатор.

Key words:
Homogeneous magnetic field, magnetic anomaly, fluxgate pattern, liquid level switch.

При поиске подземных стальных нефте- и газопроводов, очистных, калибровочных и диагностических внутритрубных снарядов, затонувшей техники, а также скрытых строительных сооружений возникает задача обнаружения локальных магнитных неоднородностей в неферромагнитных укрывающих средах (земле, воде, снеге). Известны следующие методы обнаружения металлических объектов в укрывающих средах:

- индукционный;
- магнитометрический;
- радиолокационный;
- сейсмоакустический.

Практическое применение находят, в основном, первые два метода из перечисленных [1], т. к. реализуются при помощи наиболее функционально принадлежных чувствительных элементов (ЧЭ). Основное отличие магниточувствительных приборов от индукционных заключается в том, что они могут находить только ферромагнитные предметы. По отношению к искомому объекту магниточувствительные приборы являются пассивными – как правило, не оказывающими на него магнитного воздействия.

На земной поверхности магнитометрический метод заключается в выявлении на фоне нормального магнитного поля Земли (НМПЗ) его аномалии. Вектор НМПЗ представляет собой историческую и геофизическую константу по направлению действия и уровню: $|\boldsymbol{T}|_{\text{НМПЗ}} \approx 5 \cdot 10^4$ нТл. По сравнению с НМПЗ магнитные аномалии (МА), источниками которых являются искомые ферромагнитные предметы, незначительны – 5...500 нТл. Следовательно, в общем случае задача поиска подземных ферромагнитных объектов состоит в определении малых приращений больших величин.

Существует несколько физических принципов и основанных на них типов магнитометрических приборов, позволяющих фиксировать минимальные изменения НМПЗ [1]:

- квантовые и сверхпроводящие магнитометры;
- магнито-оптические преобразователи;
- датчики Холла;
- феррозондовые магнитометры.

На фоне высокой чувствительности приборов первых двух классов основным их недостатком является отсутствие осевой направленности ЧЭ и, следовательно, невозможность определения пространственной ориентации вектора магнитного поля, создаваемого объектом измерения (ОИ). Это может внести неясность в результат измерения, особенно если требуется точное определение местоположения ферромагнитного объекта, как, например, при поиске остановившегося в магистральном трубопроводе внутритрубного снаряда. Кроме того общим недостатком квантовых, сверхпроводящих и оптико-механических магнитометров является их громоздкость, а также низкое быстродействие, что в совокупности может привести к пропуску объекта поиска при быстром сканировании.

В полевых условиях наиболее широкое применение нашли феррозондовые приборы, характеризующиеся не только высокой чувствительностью и стабильностью метрологических характеристик, но и осевой направленностью, что дает возможность непосредственного измерения составляющих вектора магнитного поля, обеспечивая тем самым получение полной информации о его структуре и источниках. Феррозондовые магнитометры (ФМ) пригодны для работы со слабыми магнитными полями в широком температурном диапазоне и отличаются высокой надежностью, малым энергопотреблением и низкой стоимостью. Собственные шумы новейших феррозондовых приборов находятся на уровне порядка 10^{-12} Тл, т. е. на два порядка ниже, чем, например, у датчиков Холла [1].

Диаграмма направленности феррозонда позволяет использовать его в качестве ориентируемого в пространстве устройства относительно силовых линий поля Земли. Однако для построения поискового магнитометра это свойство является скорее недостатком, т. к. НМПЗ на несколько порядков превосходит поля, создаваемые ОИ, а в процессе поиска изменение ориентации ЧЭ преобразователя неизбежно. Поэтому для решения задачи устранения влияния ориентации магнитометра должны быть применены нетривиальные методологические, конструктивные и схемные приемы.

Одним из таких приемов является применение трехкомпонентных феррозондовых преобразователей [2]. Они позволяют определять модуль суммар-

ного вектора магнитного поля при любой пространственной ориентации магнитометрического датчика. Однако при этом усложняется конструкция магнитометра, что связанно с трудностью прецизионного расположения элементов датчика во взаимоортогональных плоскостях. Сложность изготовления такого магнитометра неизбежно ведет к его удорожанию. Кроме того чувствительность таких магнитометров не может быть высокой, т. к. феррозонды измеряют магнитные величины, близкие к $|\boldsymbol{T}|$нмпз, т. е. высокого уровня. Поэтому при поиске подземных ферромагнитных объектов нашел применение метод с однокомпонентным, вертикально ориентированным феррозондом, скомпенсированным по НМПЗ, т. е. измеряющим в режиме воздействия на его ось чувствительности (ОЧ) единственную магнитную величину – вектора МА.

Реализация метода представляется перспективной в устройстве, содержащем объект измерения в виде МА-источника постоянного магнитного поля, генератор, подключенный к обмотке возбуждения дифференциального феррозонда, имеющего сигнальную обмотку, а также дополнительную обмотку компенсации. Феррозондовый датчик удерживается оператором над подземной МА в вертикальном положении. Воздействия фоновых по отношению к объекту измерения магнитных полей, в том числе НМПЗ, компенсируются в магнитных сердечниках дифференциального феррозонда током в обмотке компенсации, уровень которого схемными методами устанавливается пропорциональным каждому из фоновых воздействий [3]. Данное устройство фактически представляет собой систему управления по возмущающим воздействиям случайных уровней, является сложным в изготовлении, настройке и эксплуатации. Кроме того, регулирование компенсирующего поля постоянным током в обмотке ФМ определяет малые стабильность и быстродействие устройства.

Существует метод обнаружения подземных магнитных объектов, в основу которого положен тот факт, что вертикальная составляющая вектора НМПЗ является постоянной $|\boldsymbol{Z}|$=const в радиусе 10 км на поверхности Земли. При реализации метода для автоматической установки оси чувствительности ФМ в пространстве вертикально, широко применяются различные гравитационные ориентаторы [4]. Поскольку поиск объекта производится оператором, находящимся в движении, неизбежно появление погрешностей ориентации вследствие импульсных и высокочастотных механических помех. Для их демпфирования применяется карданов подвес, который вместе с датчиком помещен в непроводящую электрический ток жидкость, рис. 1. Для достижения более высоких точности и стабильности ориентации феррозонда магнитометр оснащен жидкостным коммутатором, разрешающим выборку значения измеряемого магнитного поля только при совпадении магниточувствительной оси феррозонда с вертикалью.

Жидкостный маятниковый коммутатор (ЖМК) представляет собой капсулу особой формы, заполненную токопроводящей жидкостью так, что имеется пузырёк воздуха, размыкающий контакты капсулы в момент вертикального положения феррозонда. Угловая чувствительность ЖМК не хуже 0...1,5°. Функциональная схема устройства приведена на рис. 2.

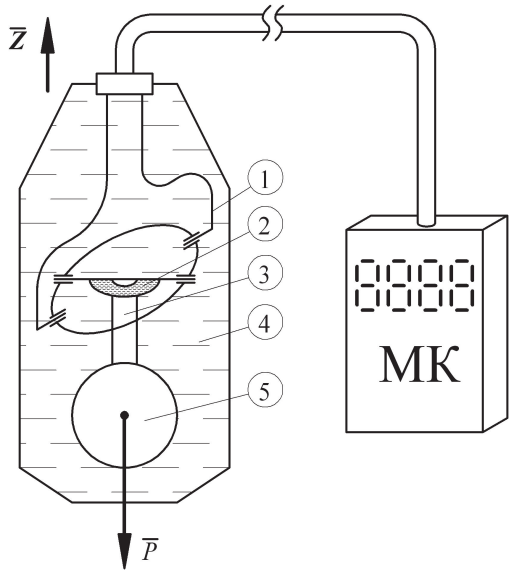


Рис. 1. *Обобщенная схема устройства: 1) подвес гравитационного ориентатора; 2) жидкостный маятниковый коммутатор; 3) феррозондовый датчик; 4) демпфирующая жидкость; 5) груз маятника; МК – микроконтроллер с электронным преобразователем сигналов ФМ; **P** – вектор силы тяжести; **Z** – вертикальная составляющая НМПЗ*

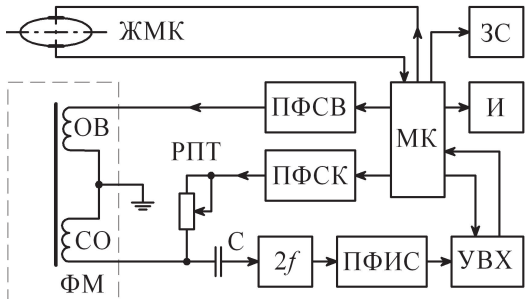


Рис. 2. *Функциональная схема однокомпонентного феррозондового магнитометра: ФМ – феррозондовый магнитометр; ОВ – обмотка возбуждения феррозонда; СО – сигнальная обмотка феррозонда; ЖМК – жидкостный маятниковый коммутатор; С – разделительный конденсатор; ПФСВ – преобразователь формы сигнала возбуждения частоты f; 2f – полосовой фильтр; ПФИС – преобразователь формы измерительного сигнала; УВХ – устройство выборки-хранения; МК – микроконтроллер; ПФСК – преобразователь формы сигнала компенсации; РПТ – регулятор постоянного тока; И – индикатор цифровой; ЗС – звуковой сигнализатор вертикали*

Работа устройства заключается в следующем. Феррозондовый датчик устанавливается по ЗС – звуковому сигналу в вертикальное положение вблизи поверхности Земли на участке с наименьшей концентрацией магнитных аномалий, которая определяется по показанию индикатора И, отображающему известную для данных географических координат

величину Z=const. Измерительная часть ФМ с высокой точностью воспроизводит Z-составляющую НМПЗ лишь в строго вертикальном положении ОЧ. При отклонении ОЧ от вертикали ФМ воспринимает еще и горизонтальную составляющую НМПЗ, что является ложным сигналом наличия МА.

По ЗС в условиях НМПЗ оператор производит регулирование РПТ до наименьшего значения показаний индикатора И, которое означает компенсацию магнитным полем СО фонового Z=const магнитного воздействия на ОЧ ФМ. Измерение возможно лишь в строго вертикальном положении модуля ФМ – ЖМК, когда один из контактов жидкостного коммутатора изолирован, что приводит к срабатыванию компаратора в структуре МК, инициирующего УВХ и начало цикла АЦП-преобразования и индикации, длительность которого составляет 3...10 с. Если очередной результат измерения на индикаторе И превышает предыдущий, то оператор перемещается по земной поверхности в направлении залегания магнитной аномалии. Если числовое значение на индикаторе уменьшилось, оператору следует вернуться на предыдущую позицию и скорректировать направление движения по показаниям индикатора. Точное местоположение скрытой подземной МА соответствует максимальному отклонению численного значения на индикаторе И от первоначально установленного.

Удаленность оператора более чем на 10 км от первоначального места измерений при перемещении по географическому меридиану приводит к изменению Z-составляющей НМПЗ на величину, соизмеримую с уровнем чувствительности ФМ. Поэтому РПТ является прецизионным элементом магнитометра, определяющим начальные условия поиска подземной МА – устанавливающим ток компенсации ФМ в соответствии с известным Z=const, что дает нулевое внешнее магнитное воздействие на ФМ и обеспечивает его высшую (пороговую) чувствительность к МА – порядка 0,2 нТл.

ЖМК является прецизионным исполнительным элементом магнитометра, исключающим в условиях НМПЗ воздействие горизонтальной его составляющей на ОЧ ФМ, что обеспечивает в момент измерения строгое равенство поля компенсации ФМ значению Z=const, т. е. обнаружение МА на уровне порога чувствительности ФМ.

Магнитометр выполнен в виде переносного прибора с автономным встроенным источником питания. Феррозондовый датчик и капсула ЖМК размещены в немагнитном цилиндрическом корпусе и соединены с прибором при помощи кабеля согласно схеме рис. 2.

Технические характеристики прибора:

1. Габариты капсулы датчика, мм: ∅34×72.
2. Масса датчика, г: 175.
3. Габариты корпуса прибора, мм: 16,5×12,8×5,2.
4. Масса прибора, г: 350.
5. Длина соединительного кабеля, м: 1,5.
6. Напряжение питания, В: 6±3 %.
7. Ток потребления датчика, мА: 27.
8. Суммарный ток потребления прибора, мА: 110.

Таким образом, сочетание в разработанном комплексном приборе: компенсационной схемы ФМ, прецизионного исполнительного элемента ЖМК и метода, основанного на свойстве НМПЗ Z=const в области заданного радиуса, обеспечивает совокупность позитивных, по сравнению с аналогами, функциональных признаков:

- измерение производится в момент 100-процентной компенсации ФМ, т. е. в режиме его наибольшей чувствительности к МА;
- уровень поля компенсации ФМ, эквивалентный Z=const, остается в цикле измерений неизменным, что повышает стабильность, быстродействие, технологичность измерительного процесса;
- совмещение по вертикали осей чувствительности прецизионных ФМ и ЖМК с погрешностью не хуже 12 угл. мин. обеспечивает минимизацию радиуса залегания обнаруженной подземной МА.

Создан макетный образец комплексного прибора, проведены стендовые испытания по обнаружению МА, подтверждающие устойчивость результатов измерений в условиях механических помех, а также высокую чувствительность компенсационной схемы феррозондового магнитометра.

Выводы

1. Разработан феррозондовый магнитометрический прибор, обладающий свойством идентификации параметров, поскольку среди металлосодержащих предметов чувствителен только к ферромагнетикам.
2. Диаграмма направленности феррозондового магнитометра в сочетании с жидкостным прецизионным индикатором вертикали обеспечивает повышенную точность определения местоположения скрытого подземного объекта.
3. Совмещение в моменты измерений оси чувствительности магнитометрического датчика с вертикалью обеспечивает его компенсацию полем неизменного уровня, что в цикле поисковых операций повышает стабильность, быстродействие, технологичность измерительного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В. Средства измерения параметров магнитного поля. – Л.: Энергия, 1976. – 320 с.
2. Способ измерения полного вектора магнитного поля, а также устройство для его осуществления: пат. 2218577 Рос. Федерация. № 2001130411/09; заявл. 09.11.01; опубл. 10.12.03, Бюл. № 34. – 587 с.
3. Устройство для обнаружения очистного поршня в трубопроводе: пат. 2123897 Рос. Федерация. № 5062216/12; заявл. 14.09.92; опубл. 27.12.98, Бюл. № 36. – 307 с.
4. Устройство ориентирования датчиков в геофизических приборах: авт. свид. 1346772 СССР. № 3986259/22-03; заявл. 09.12.85; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39. – 146 с.

Поступила 30.06.2011 г.

Геохимия

УДК 552.31:546.71

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕНИЯ В ФОРМАЦИОННЫХ ТИПАХ УЛЬТРАМАФИТОВ СИБИРИ

А.Ф. Коробейников, А.И. Чернышов*

Томский политехнический университет
E-mail: paya@tpu.ru
*Томский государственный университет
E-mail: aich@ggf.tsu.ru

Ультрамафиты офиолитовых, щелочно-ультраосновных субвулканических комплексов складчатых систем Саян и Алданского щита несут от 0,2 до 569 мг/т Re. Высокими концентрациями элемента обладают дуниты и гарцбургиты Калнинского и Кызыр-Бурлюкского массивов Куртушибинского (Западно-Саянского) офиолитового пояса, а также Оспинского массива Восточно-Саянского пояса с содержаниями Re до 383 и до 167 мг/т, соответственно. Обсуждаются особенности распределения Re в различных структурно-деформационных типах ультрамафитов. Наименее деформированные протогранулярные дуниты Восточного Саяна имеют повышенные содержания Re 56...90 мг/т. В пластически деформированных разностях пород с наиболее упорядоченной мезогранулярной структурой содержится всего 1...15 мг/т Re. В синтектонически рекристаллизованных дунитах и гарцбургитах с порфирокластовой, порфиролейстовой и мозаичнолейстовой структурами содержания рения варьируют от 2 до 167 мг/т. Хромитовые руды офиолитовых комплексов содержат от 23 до 383 мг/т Re. Серпентиниты, как продукты низкотемпературного метасоматоза, характеризуются как низкими фоновыми, так и аномальными концентрациями рения до 547 мг/т. В дунитах щелочно-ультраосновного Инаглинского массива (Алданский щит) с разными деформационными микроструктурами и ассоциирующих с ними верлитах, клинопироксенитах, а также метасоматитах отмечаются обычно низкие содержания Re от 0,3 до 36,4 мг/т. Наиболее высокие концентрации рения до 6,8 г/т установлены в гранатовых перидотитовых включениях в кимберлитовых телах Сибирской платформы, что, вероятно, обусловлено процессами перераспределения вещества при внутримантийном высокотемпературном метасоматизме.

Ключевые слова:
Рений, магматические комплексы, ультрамафиты, метаморфизм, метасоматоз.

Key words:
Rhenium, magmatic complex, ultramafic, metamorphism, metasomatism.

Введение

Рений весьма востребованный элемент – он широко используется в авиакосмической, электронной промышленности, при изготовлении суперсплавов, жаропрочных и каталитических материалов [1, 2]. Его извлекают преимущественно при переработке различных медных, молибденовых, урановых и других руд как попутный компонент. Основной сырьевой базой рения служат медносульфидные и молибденовые концентрации, реже шунгитовые скопления, урановое сырьё, фумарольные образования современных и древних вулканов. Поэтому геохимические и металлогенические прогнозно-поисковые исследования сегодня направлены преимущественно на выяснение геолого-генетических, формационных и иных причин накопления рения в различных продуктах геологических процессов.

Коллективом геолого-аналитического центра «Золото-платина» Томского политехнического университета проводятся работы по выяснению распределения рения в горных породах, рудах, минералах золоторудных, медно-молибден-порфировых, колчеданно-полиметаллических, скарново-магнетитовых, золотосульфидных черносланцевых месторождений Сибири, Монголии, Казахстана, Урала [3, 4]. Установлены необычно повышенные концентрации Re не только в традиционных медно-молибден-сульфидных образованиях гранитоидных интрузий, но и в глубинных ультрамафит-мафитовых магматитах и особенно во включениях метасоматически преобразованных их разностей в кимберлитовых телах. Здесь концентрации Re достигают значений 6,8 г/т, т. е. приобретают промышленное значение.

Расширение числа объектов для геохимических исследований на рений потребовало специальной разработки высокочувствительного метода анализа природного вещества на данный элемент. Поэтому в центре «Золото-платина» ТПУ была разработана новая методика инверсионно-вольтамперометрического анализа геохимических проб горных пород, минералов на рений [1, 5, 6].

Основной целью геолого-геохимических исследований явилось установление закономерностей фонового и аномального распределения рения в ультрамафитах, мафитах и ассоциирующих с ними метасоматитах, а также выяснение его поведения при автометасоматических верхнемантийных и внутрикоровых гидротермальных процессах. Полученная новая геохимическая информация, представленная в данной статье, дает общее представление о фоновом распределении рения в глубинных породах земной коры и верхней мантии. Она может иметь важное значение для дальнейшего общего познания геохимии и минерагении данного элемента.

Методика определения рения в породах и минералах

При выборе наиболее экспрессного и простого метода определения рения в природных объектах авторы остановились на методе инверсионной вольтамперометрии (ИВА). Этот метод разработан Л.Г. Гольц [1] в геолого-аналитическом центре «Золото-платина» Томского политехнического университета.

Метод ИВА с графитовым электродом позволяет определять Re в пробах горных пород, руд и минералов разного состава в диапазоне содержаний до $1 \cdot 10^{-7}$ мас. %

Правильность определения элемента оценивалась сопоставлением получаемых результатов по стандартным образцам, по параллельному анализу проб рентгенофлюоресцентным методом (РФА). Масса навески составляла 1 г. В табл. 1 приведены данные сопоставительного анализа определений рения этими методами. Из таблицы видна достаточно хорошая сходимость результатов анализов проб пород и руд.

Методика выделения и определения Re в пробах представляет многостадийный процесс. Для перевода элемента в раствор пробы обрабатывались азотной кислотой. Из оксидов, сульфидов пород Re окисляется до высшей степени +7, переходя в перренат-ион или рениевую кислоту. Полнота вскрытия пробы на Re достигается использованием избытка азотной кислоты при нагреве раствора до 150...170 °С с целью предотвращения потерь летучего рения в виде Re_2O_7. Обжиг проб не проводился, поскольку при температуре 250 °С начинаются потери Re_2O_7, а при 350 °С он полностью улетучивается. Поскольку совместно с Re в раствор переходят Mo, Ag, Cu, Fe и другие элементы, для их устранения использовано сорбционное концентрирование рения на активированный уголь. Оптимальные условия адсорбции: pH раствора 2...3, крупность угля 0,3...0,8 мм, температура раствора не выше 25 °С, скорость пропускания раствора через активированный уголь до 100 объемов в час.

Таблица 1. *Результаты определения содержаний рения в золоторудном минеральном сырье методами ИВА и РФА*

Месторождение	Материал пробы	Содержания Re, $n \cdot 10^{-5}$, мас. %	
		ИВА	РФА
Нежданинское (Якутия)	Пирит рудных тел вкрапленного типа	7,12±0,05	7,12±0,06
	Пирит жильных рудных тел	0,82±0,04	1,07±0,04
Боко-Васильевское (СВ Казахстан)	Пирит, арсенопирит, халькопирит	9,61±0,06	10,20±0,02
Акжал (СВ Казахстан)	Сульфитизированный алевролит	4,21±0,03	4,18±0,03
Баладжал (СВ Казахстан)	Черные углеродные сланцы	0,84±0,04	0,83±0,04
Джумба (СВ Казахстан)	Пирит, арсенопирит	0,96±0,03	0,95±0,04
Бакырчик (СВ Казахстан)	Сульфитизированный алевролит	1,78±0,03	2,04±0,02
Большевик (СВ Казахстан)	Пирит, арсенопирит, пентландит	3,17±0,05	3,16±0,02
Сухой Лог (Забайкалье)	Кремнисто-углеродистые алевролиты	0,37±0,004	0,56±0,05
Олимпиадинское (Енисейский Кряж)	Углеродистые сланцы	0,54±0,02	0,63±0,03

Объекты исследования

Объектами исследования на рений являются ультрамафиты различных формационных типов. Были изучены ультрамафиты офиолитовых, щелочно-ультраосновных, субвулканических комплексов, а также включения ультрамафитов в кимберлитах.

Ультрамафиты офиолитовых комплексов изучались на примере Оспинского массива (Восточно-Саянский офиолитовый пояс), Калнинского и Кызыр-Бурлюкского массивов (Куртушибинский офиолитовый пояс), а также мелкие реститовые тела ультрамафитов Идарского зеленокаменного пояса Канского блока. Ультрамафиты щелочно-ультраосновных комплексов исследовались в Инаглинском массиве (Алданский щит). Субвулканические ультрамафитовые интрузии изучались в Идарском зеленокаменном поясе Канского блока Восточного Саяна. Объектом исследования также являются ультраосновные включения из кимберлитов Якутии (образцы из коллекции Б.В. Олейникова, Якутский филиал СО РАН).

Массивы офиолитовых комплексов. Оспинский массив представляют собой крупное пластинообразные будинированное тело, сложенное метаморфическими дунитами и гарцбургитами и, реже, кумулятивными образованиями [7, 8]. Метаморфиче-

ские дуниты и гарцбургиты характеризуются значительным разнообразием деформационных микроструктур оливина, отражающих степень пластических деформаций пород и объединяемых в семь последовательно образовавшихся главных типов: протогранулярный, мезогранулярный, порфирокластовый, порфиролейстовый, мозаичный, мозаично-лейстовый [9]. Переход от одного типа микроструктур к другому характеризуется возрастанием роли признаков пластических деформаций: полос излома, неоднородности погасания, изменении конфигурации границ зерен оливина, их степени ориентации и увеличении роли рекристаллизованных индивидов. В процессе пластических деформаций пород происходит изменение химического состава оливина и хромшпинелида. Направленность изменения состава минералов определяется термодинамическими условиями их метаморфогенного преобразования, которые могут фиксироваться в доминирующем механизме пластического деформирования.

В Калнинском массиве с нетрадиционным платино-палладиевым типом оруденения [10] пластически деформированные дуниты и гарцбургиты претерпели вторичную рекристаллизацию отжига с образованием грубозернистых и пегматоидных структур, очевидно под воздействием глубинного теплового потока. В свою очередь пегматоидые разности дунитов и гарцбургитов в тектонически активных зонах также подвергались пластическим деформациям с образованием порфирокластовых структур.

Серпентиниты в изученных ультрамафитовых массивах офиолитовых комплексов пользуются значительным распространением, среди них выделяются аподунитовые и апогарцбургитовые разности.

Ультрамафиты кумулятивной серии офиолитовых комплексов представлены породами верлит-клинопироксенитовой ассоциации. Эти породы также были подвержены пластическим деформациям, что фиксируется наличием в минералах неоднородного погасания, полос излома и признаков синтектонической рекристаллизации.

***Инаглинский щелочно-ультраосновной м**ассив.* Внутренняя структура ультрамафитов в щелочно-ультраосновных комплексах, в отличии от ультрамафитовых массивов офиолитовых комплексов, сформировалась в более стабильной тектонической обстановке. При этом устанавливаемые структурные элементы в этих массивах имеют гетерогенную природу и создавались в результате последовательного проявления динамометаморфических процессов [7].

Ультрамафиты Инаглинского массива представлены метаморфогенными дунитами, которые отличаются большим разнообразием деформационных микроструктур. Установленные микроструктуры подразделяются на пластически деформированные: протогранулярный, пегматоидно-порфирокластовый, мезогранулярный, порфирокластовый, мозаичный типы и образовавшиеся в результате вторичной рекристаллизации отжига: пегматоидный, лейстовый, мозаично-лейстовый и идиобластовый типы. По дунитам часто образуются серпентиниты. Среди дунитов ограниченным распространением пользуются верлиты и клинопироксениты.

Комплекс субвулканических ультрамафитовых массивов пользуются значительным распространением в идарском зеленокаменном поясе Канского блока Восточного Саяна и объединяются в кингашский дунит-верлит-пикритовый комплекс [11, 12]. Наиболее представительным массивом этого комплекса является Кингашский массив, с которым связано Cu-Ni-Pt-месторождение [13]. Ультрамафиты этого комплекса представлены мелкими линзовидными телами с размерами до 3×0,7 км (Кингашский массив), которые обычно имеют северо-западное простирание и являются конкордантными к структуре пород обрамления. Они представлены магматическими породами дунит-верлит-пикритовой ассоциации: включающими дуниты, верлиты, их серпентинизированные разности, а также разнообразные по составу метапикриты. Характерной особенностью этих пород является наличие в них кумулятивных и бластопорфировых структур, свидетельствующих об их образовании в гипабиссальных и субвулканических условиях. Значительное разнообразие петрографического состава ультрамафитов кингашского комплекса на исследуемой территории, вероятно, обусловлено значительной степенью дифференцированности исходных магматических расплавов пикритового состава и глубиной их кристаллизации.

Ультраосновные включения из кимберлитов были любезно предоставлены Б.В. Олейниковым. Они преимущественно представлены гранатовыми перидотитами, метасоматическими измененными глубинными флюидами, обогащенными щелочами, титаном и ниобием [14]. Наличие таких включений в кимберлитах, по мнению О.Б. Олейникова, очевидно свидетельствует о масштабности метасоматических процессов в области зарождения кимберлитовых расплавов. Более ранние исследования зональных гранатов в перидотитовых включениях из кимберлитовых трубок Сибирской платформы также свидетельствуют о проявлении глубинного метасоматоза в верхней мантии [15].

Распределение рения в ультрамафитах и ассоциирующих с ними породах

Распределения рения в ультрамафитах представлено в табл. 2 и на рисунке, в которых приведены результаты анализов дунитов, гарцбургитов, серпентинитов, верлитов, пироксенитов, хромититов, пикритов, ультраосновных включений в кимберлитах. На рисунке отражено распределение средних содержаний рения в породах ультраосновных массивов Сибирского региона.

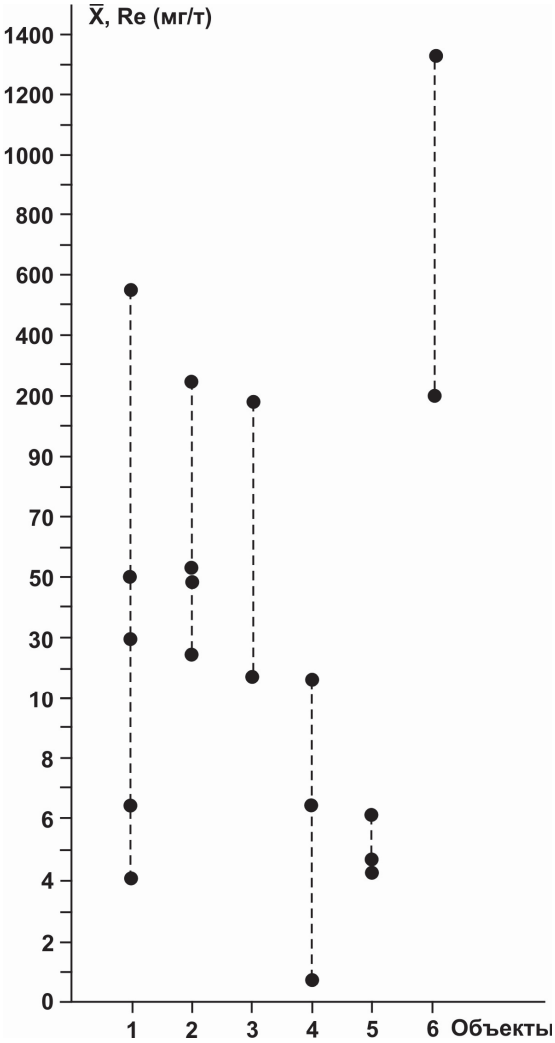


Рисунок. *График распределения средних содержаний рения (мг/т) в различных ультраосновных породах (снизу вверх) исследуемых объектов: 1) Оспинский массив: клинопироксениты, верлиты, гарцбургиты, дуниты, серпентиниты с сульфидами; 2) Калнинский массив: хромититы, дуниты, гарцбургиты, дуниты пегматоидные; 3) Кызыр-Бурлюкский массив: верлиты, дуниты пегматоидные; 4) Инаглинский массив: клинопироксениты, дуниты, метасоматиты; 5) кингашский субвулканический комплекс: перидотиты, дуниты, пикриты; 6) ультраосновные включения в кимберлитах: гранатовые перидотиты*

Офиолитовые комплексы

Ультрамафиты офиолитовых комплексов изучались на примере Оспинского массива (Восточно-Саянский офиолитовый пояс), Калнинского и Кызыр-Бурлюкского массивов (Куртушибинский офиолитовый пояс).

В ***Оспинском массиве*** анализ распределения рения проводился в пластически деформированных дунитах и гарцбургитах, а также в хромититах, серпентинитах, верлитах, и клинопироксенитах.

В гарцбургитах, которые являются наименее деплетированными ультрамафитами, среднее содержанием рения составляет 29,7 мг/т. Дуниты, представляющие наиболее деплетированные образования, содержат большие его концентрации, в среднем 49,4 мг/т. Отмечаются заметные вариации элемента в породах в зависимости от степени их пластического деформирования. Исходные дуниты с протогранулярной структурой несут повышенные концентрации рения (~77,3 мг/т), а протогранулярные гарцбургиты отличаются заметно меньшими значениями (~25,0 мг/т). Минимальные концентрации рения отмечаются в пластически деформированных дунитах и гарцбургитах с наиболее упорядоченной, равновесной мезогранулярной структурой (~8,0 и ~4,0 мг/т, соответственно). В синтектонически рекристаллизованных ультрамафитах (с порфирокластовой, порфиролейстовой и мозаично-лейстовой структурами) наблюдаются значительные вариации рения, иногда с аномально высоким содержанием (2,0...81,0 и 4,0...167,0 мг/т, соответственно в дунитах и гарцбургитах), очевидно обусловленных перераспределением элемента в процессе пластического течения при высоких температурах и высокой скорости деформации.

Для карбонатизированных серпентинитов массива, образовавшихся на месте дунитов и гарцбургитов в результате наложенного низкотемпературного метасоматоза, выявляются аномально высокие конценцентрации рения (~547,0 мг/т).

Хромититы, локализованные среди дунитов, отличаются значительными вариациями рения от минимальных 3,0 до аномальных 117 мг/т.

Верлиты и клинопироксениты, являющиеся продуктами высокотемпературного метасоматоза, отличаются минимальными содержаниями рения (~5,3 мг/т).

Калнинский и Кызыр-Бурлюкский массивы. В пластически деформированных гарцбургитах и дунитах Калнинского массива с порфирокластовыми структурами средние содержания рения составляют 53,5 и 48,0 мг/т, соответственно, и оказываются близкими с аналогичными ультрамафитами Оспинского массива. Однако грубозернистые и пегматоидные дуниты Калнинского и Кызыр-Бурлюкского массивов, претерпевшие вторичную высокотемпературную рекристаллизацию отжига, отличаются от пластически деформированных аномально высокими содержаниями (от 94 до 383 мг/т, при среднем 221 мг/т).

В хромититах содержание рения, примерно, в два раза меньше (23 мг/т), чем во вмещающих пластически деформированных дунитах.

В верлитах содержание рения также низкое, как и аналогичных породах Оспинского и Харанурского массивов, и составляет от 4...6 мг/т, отмеченные более высокие содержания до 32 мг/т, очевидно связаны с незначительной степенью клинопироксенизации.

Таблица 2. *Распределение рения (мг/т) в ультрамафитах различных формационных типов из разных регионов Сибири*

Горная порода	Число проб	Содержание Re		
		от	до	$\bar{X}$
Оспинский массив Восточно-Саянского офиолитового пояса				
Дуниты протогранулярные	3	56	90	77,3
Дуниты мезогранулярные	2	1	15	8,0
Дуниты порфирокластовые	2	40	71	55,5
Дуниты порфиро-, мозаичнолейстовые	3	2	81	45,0
Гарцбургиты протогранулярные	1	–	25	25,0
Гарцбургиты мезогранулярные	3	3	5	4,0
Гарцбургиты порфиролейстовые	2	12	167	89,5
Гарцбургиты мозаичнолейстовые	2	13	34	23,5
Серпентиниты с сульфидами	2	525	569	547
Верлиты, клинопироксениты	4	3	10	5,3
Хромититы	2	3	117	60
Калнинский и Кызыр-Бурлюкский массивы Западно-Саянского (Куртушибинского) офиолитового пояса				
Дуниты	3	40	55	48,0
Дуниты пегматоидные	3	94	383	235,0
Гарцбургиты	2	40	67	53,5
Верлиты	3	4	32	14,0
Хромититы	1	–	23	23,0
Инаглинский массив щелочно-ультраосновного комплекса Алдана				
Дуниты протогранулярные	4	1,4	7,8	3,3
Дуниты пегматоидно-порфирокластовые	8	1,0	24,3	6,8
Дуниты порфирокластовые	3	2,7	13,9	7,5
Дуниты лейстовые	3	1,7	15,7	10,4
Дуниты мозаично-лейстовые	8	1,3	6,0	3,1
Дуниты мозаичные	7	1,4	36,4	6,9
Дуниты идиобластовые	5	1,7	18,7	8,3
Верлиты, клинопипроксениты	2	2,1	3,1	2,7
Метасоматиты	11	4,6	34,0	12,2
Кингашский субвулканический дунит-верлит-пикритовый комплекс Канской глыбы. СЗ Восточного Саяна				
Дуниты	2	2,7	6,7	4,7
Перидотиты	2	0,6	7,9	4,2
Пикриты	10	0,2	16,8	6,1
Ультраосновные включения из кимберлитов Якутии				
Перидотиты гранатовые	24	194	6803	1332

Анализы пород выполнены в лаборатории геолого-аналитического центра Томского политехнического университета методом инверсионной вольтамперометрии. Аналитики Л.Г. Гольц, Э.В. Горчаков, Т.С. Глызина, З.С. Михайлова.

Щелочно-ультраосновные комплексы

В ***Инаглинский массиве*** доминирующими породами являются дуниты с разнообразными деформационными микроструктурами при подчиненной роли щелочных пород и сопровождаемых их метасоматитов. Для всех дунитов с различными структурными типами устанавливаются низкие содержания рения (~5,7 мг/т), при этом вариации элемента незначительные и составляют от 0,4 до 18,7 мг/т, лишь в единичных образцах его концентрации заметно возрастает до 36,4 мг/т. В клинопироксенизированных дунитах содержания рения очень низкие (~2,6 мг/т), сопоставимая с близкими породами офиолитовых комплексов. В щелочных метасоматитах отмечается тенденция к возрастанию концентраций рения по отношению к дунитам, при среднем ~12,2 мг/т, вариации составляют от 4,6 до 34 мг/т.

Комплекс субвулканических ультрамафитовых массивов

В составе этого комплекса изучались породы из различных мелких массивов северо-западной части Канского блока, которые представлены дунитами, серпентинитами, апоперидотитовыми метасоматитами, пикритами. Для дунитов и перидотитов отмечаются низкие средние концентрации рения (4,7 и 4,2 мг/т, соответственно). Пикриты отличаются неоднородностью концентраций рения от 0,2 до 16,8, в среднем 4,8 мг/т.

Ультраосновные включения из кимберлитов

Ультраосновные включения из кимберлитов характеризуются значительными вариациями и максимальными концентрациям рения, при этом значительно отличаются от ультрамафитов других формационных типов. Содержание рения составляют от 194 до 6803 мг/т.

Обсуждение результатов исследования

Особенности распределения рения в ультрамафитах заключаются в следующем.

1. Ультрамафиты офиолитовых комплексов складчатых поясов Сибири характеризуются неоднородным распределением рения от пониженных до умеренных и высоких в изученных массивах Западного и Восточного Саяна. Вариации средних содержания элемента в дунитах, гарцбургитах с разными деформационными структурами составили от 4,0 до 235,0 мг/т (табл. 2, рисунок).

Мелкие тела хромититов, установленные в изученных массивах, характеризуются значительными вариациями элемента от низких 3,0 до повышенных 117 мг/т (Оспинский массив) (табл. 2).

В карбонатизированных сульфидизированных серпентинитах Оспинского массива выявлены аномально высокие концентрации рения (525...547 мг/т) (табл. 2). Очевидно происходит существенное перераспределение рения в серпентинитах в процессе наложенной сульфидной минерализации.

Верлиты и клинопироксениты, представляющие кумулятивную серию офиолитовых комплексов, отличаются очень низкими содержаниями рения обычно менее 10 мг/т.

2. Специальное изучение распределения рения в различных структурно-деформационных типах ультрамафитов офиолитовых комплексов свидетельствуют о существенном перераспределении элемента в процессе пластического деформирования породах. Особенно наглядно эта тенденция про-

явилась в Оспинском массиве Восточного Саяна. В исходных наименее деформированных протогранулярных дунитах среднее содержание Re составляет 77 мг/т, а в наиболее пластически деформированных дунитах, гарцбургитах с наиболее упорядоченной структурой его содержания существенно уменьшаются до 4 и 8 мг/т, соответственно. В синтектонически рекристаллизованных ультрамафитах с порфирокластовой, порфиролейстовой и мозаично-лейстовой структурами установлены наиболее значительные вариации содержаний элемента от 2 до 167 мг/т, обусловленные крайне неравномерным его перераспределением в процессе неоднородных пластических деформаций.

3. В щелочно-ультраосновном Инаглинском массиве Алдана преобладающие дуниты отличаются низкими содержаниями рения (~5,7 мг/т) при незначительных вариациях в породах с различными деформационными микроструктурами. В ассоциирующих с дунитами щелочных метасоматитах концентрации рения остаются низкими, с проявление слабой тенденции к увеличению. Что вероятно свидетельствует о нейтральном балансе элемента в процессе перераспределения вещества при метасоматозе.

4. Субвулканические ультрамафитовые комплексы Канского блока Восточного Саяна отличаются низкими содержаниями рения и его незначительными вариациям в различных породах.

5. При изучении геохимии рения в метасоматически преобразованных включениях гранатовых перидотитов в кимберлитовых телах Сибирской платформы установлено необычно высокое содержание рения до 6,8 г/т (табл. 2). Очевидно, что в областях зарождения кимберлитового магматизма осуществлялись процессы высокотемпературного метасоматического преобразования, которые обеспечивали перераспределение, вынос и накопление рения в исходных мантийных ультрамафитах.

Возможно, что установленный нами этот геохимический феномен окажется важным свидетельством становления глубинно-мантийных металлоносных систем, способных формировать в земной коре крупные редкометалльные месторождения типа Томтора [16].

Заключение

Получены новые данные по фоновому содержанию рения в разноформационных ультрамафитах массивов Сибирского региона: Оспинского, Калнинского, Кызыр-Бурлюкского, Инаглинского, Гулинского, Кингашского. Выявлено промышленно интересное накопление данного элемента в продуктах глубинного высокотемпературного внутримантийного метасоматизма ультрамафитов в зонах формирования кимберлитов – производных глубинного щелочного метасоматизма внутримантийных пород.

Изучение распределения рения в различных структурно-деформационных типах дунитов, гарцбургитов, перидотитов и их преобразованных разностях выявило последовательное сокращение содержаний элемента в последовательно деформированных образованиях: фоновые содержания Re 48...77 мг/т в исходных дунитах и пониженное до 4...8 мг/т в наиболее деформированных их разностях с наиболее упорядоченной мезогранулярной структурой. Аномально повышенные концентрации элемента возникали при наложении сульфидной фазы в серпентинитах, что, очевидно, связано с рудно-метасоматическими процессами.

Приведенные материалы по ультраосновным включениям в кимберлитах, вероятно, свидетельствуют об участии высокотемпературных метасоматизирующих флюидов глубинных систем в формировании редкометалльных месторождений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по гранту № 2.1.1/1008 «Геология и геохимия благородных и редких металлов: мантийно-коровые источники».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольц Л.Г. Вольтамперометрическое определение рения в минеральном и техногенном сырье: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск: ТПУ, 2006. – 22 с.
2. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 5. Редкие элементы. – М.: Экология, 1997. – С. 218–259.
3. Коробейников А.Ф. Мантийно-коровые рудообразующие системы комплексных месторождений благородных и редких металлов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 130 с.
4. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М. Металлургия рения. – М.: Наука, 2007. – 298 с.
5. Пшеничкин А.Я., Коробейников А.Ф., Гольц Н.А., Колпакова Н.А. О нахождении рения в рудах золоторудных месторождений черносланцевых толщ // Благородные металлы Сибири и Дальнего Востока: рудообразующие системы месторождений комплексных и нетрадиционных типов руд. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2005. – Т. 2. – С. 34–37.
6. Пшеничкин А.Я., Коробейников А.Ф., Колпакова Н.А. О концентрации рения в рудах золоторудных месторождений черносланцевых толщ // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 516–520.
7. Чернышов А.И. Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность). – Томск: Чародей, 2001. – 214 с.
8. Леснов Ф.П., Чернышов А.И., Истомин В.Е. Геохимические свойства и типоморфизм оливинов из гетерогенных ультрамафитовых пород // Геохимия. – 2005. – № 4. – С. 395–414.
9. Чернышов А.И. Петроструктурная эволюция оливинов в ультрамафитах Парамского и Шаманского массивов (Байкало-Муйский офиолитовый пояс) // Геология и геофизика. – 2005. — Т. 46. – № 11. – С. 1121–1132.
10. Подлипский М.Ю., Кривенко А.П. Платино-палладиевый тип оруденения в хромитовых рудах гипербазитов Западного Саяна // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 396. – № 1. – С. 98–101.
11. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Мишенина М.А Петрогеохимическая типизация ультрамафитов Канского блока (Восточный Саян) // Геохимия. – 2010. – № 2. – С. 126–150.

12. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrogeochemical Typification of the Ultramafic Rocks from the Idar Greenstone Belt, Kan Block, East Sayan // Geochemistry International. – 2010. – V. 4. – № 2. – P. 118–139.
13. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Ступаков С.И. и др. Кингашский мафит-ультрамафитовый массив: геологическое положение, внутреннее строение, вещественный состав и петроструктурный анализ ультрамафитов (Восточный Саян) // Платина России. Проблемы развития, оценки, воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов. Сб. научн. трудов. Т. 5. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – С. 152–175.
14. Олейников О.Б. Глубинные метасоматические ассоциации в интрузивном кимберлите // Отечественная геология. – 1998. – № 6. – С. 51–54.
15. Лазько Е.Е., Серенко В.В. Перидотиты с зональными гранатами из кимберлитов Якутии: свидетельство высокотемпературного глубинного метасоматоза и внутримантийного метасоматизма // Известия АН СССР. Сер. геол. – 1983. – № 12. – С. 41–53.
16. Кравченко С.М., Беляев А.Ю., Покровский Б.Г. Геохимия и генезис массива Томтор (север Сибирской платформы) // Геохимия. – 1992. – № 8. – С. 1094–1110.

Поступила 18.11.2011 г.

Геология нефти и газа

УДК 552.513.550.8(571.16)

ЛИТОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЮРСКИХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ГРАВЕЛИТОВ, ПЕСЧАНИКОВ И АЛЕВРОЛИТОВ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

А.В. Ежова

Томский политехнический университет
E-mail: eav@tpu.ru

Рассмотрено влияние структурно-вещественного состава гравелитов, песчаников и алевролитов на данные каротажа потенциалов собственной поляризации, кажущихся сопротивлений, индукционного, естественной радиоактивности, нейтронного и кавернометрического. Установлено, что геофизическая характеристика гравелитов и песчаников определяется составом флюидов и цементов, заполняющих межзерновое пространство, и в меньшей степени – минералогическим составом; в алевролитах основное влияние на геофизические параметры оказывает содержание глинистого материала.

Ключевые слова:
Петрография, осадочные породы, песчаники, интерпретация геофизических методов исследования.

Key words:
Petrography, sedimentary rocks, sandstones, geophysical research method interpretation.

Юрская продуктивная толща Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции сложена переслаиванием, чередованием обломочных, глинистых и углистых пород. Каждый породный слой имеет индивидуальную геофизическую характеристику. Для большей части литологических разностей терригенного разреза выработаны характеристики по основным видам каротажа, подтвержденные керном [1–5]. Однако для конкретных разрезов юго-востока Западно-Сибирской плиты с ограниченным отбором керна этих данных недостаточно. В связи с этим основной задачей исследований является выявление зависимости геофизических параметров от структурно-вещественного состава пород, их флюидонасыщения, особенностей строения на примере юрских отложений ряда нефтегазоконденсатных месторождений юго-востока Западно-Сибирской плиты (рис. 1). В данной работе приводятся результаты изучения обломочных пород.

Материалом для исследований послужили образцы керна и изготовленные из них шлифы, а также каротажные диаграммы потенциалов собственной поляризации, кажущихся сопротивлений, естественной радиоактивности, индукционного, нейтронного и кавернометрического. Индексация пластов сделана автором [6].

По структурным признакам крупнообломочные породы с размерами зерен 1,0...10,0 мм относятся к **гравелитам** [7]. В разрезах продуктивной толщи юго-востока Западно-Сибирской плиты они приурочены, главным образом, к нижнесреднеюрским отложениям (циклитам $Ю_{15}$...$Ю_{11}$).

На каротажных диаграммах (рис. 2) гравелиты характеризуются отрицательной аномалией ПС, составляющей –(37...50) мВ; значения радиоактивности равно 6...8γ, интенсивности гамма-излучения – 1,8...2,2 имп/мин. Удельное электрическое сопротивление составляет 6...10 Ом·м, увеличиваясь до 30...50 Ом·м при избирательном нефтенасыщении (рис. 2, В, Д).

На кавернограммах наблюдается увеличение диаметра скважины из-за размыва буровым раствором некрепких гравелитов.

Обломочный материал, как правило, хорошо окатан (рис. 3) при средней сортировке, что свидетельствует об активной волновой деятельности в бассейнах седиментации. В верхах циклитов встречаются также прослои с плохой сортировкой и слабой окатанностью обломочного материала из-за снижения гидродинамической активности.

Гравелиты изучаемой толщи имеют существенно кремнистый состав: отмечаются зерна кварца, иногда с включениями дипирамидальных кристал-

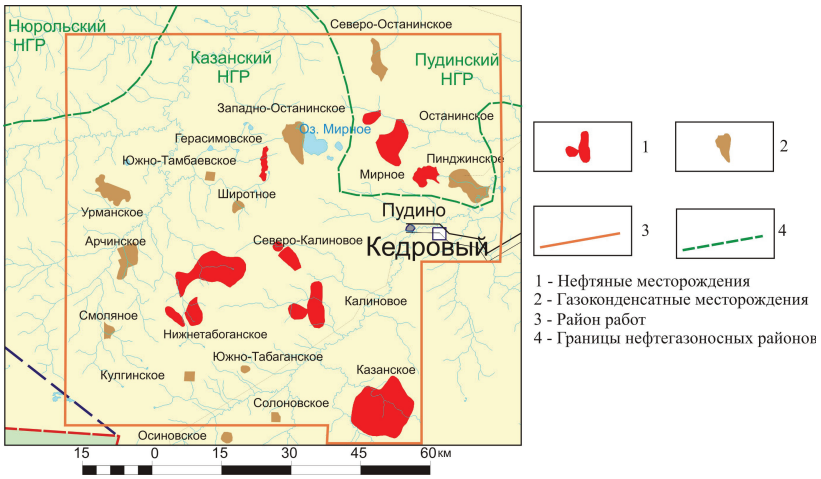


Рис. 1. *Обзорная карта района работ*

лов циркона (рис. 3, А) и других акцессориев, часто с кристаллобластовой структурой (рис. 3, Б); обломки халцедона с налетом гидроокислов железа (рис. 3, В); обилие обломков кремнистых пород (рис. 3, Г), слабо раскристаллизованных вулканических стекол (рис. 3, Д); встречаются обломки пегматитов с сильно измененными полевыми шпатами (рис. 3, Е).

Цемент в гравелитах сложен, в основном, вторичным каолинитом кристаллической структуры, заполняющим довольно крупные поры (рис. 4, А). Между индивидами каолинита наблюдаются микропоры, которые в ряде случаев заполнены темно-бурым вязким нефтяным веществом (рис. 4, В, Г). В качестве цемента, кроме каолинита, встречаются: кальцит, заполняющий поры (рис. 4, Б); сидерит, образующий пленки вокруг зерен (рис. 4, Д); участки глинисто-железистого вещества бордового цвета (рис. 4, Е).

Песчаники – мелкообломочные породы, состоящие из обломков минералов и горных пород, размеры которых колеблются от 0,1 до 1,0 мм. По размеру частиц песчаники подразделяются на крупнозернистые (1,0...0,5 мм), среднезернистые (0,5...0,25 мм) и мелкозернистые (0,25...0,1 мм).

На диаграммах ПС песчаники характеризуются глубокой отрицательной аномалией, величина потенциала достигает –(100...110) мВ в средне- и крупнозернистых песчаниках с хорошо отсортированным обломочным материалом. Если размерность зерен по разрезу изменяется мало, то кривая ПС имеет вертикальный слабо волнистый вид (рис. 5, А, Б). При уменьшении размеров зерен, ухудшении сортировки и наличии углисто-глинистых прослоев кривая ПС отклоняется вправо (рис. 5, В, Г).

На значения каротажа сопротивления (КС и ИК) влияет состав флюидов, насыщающих пустотное пространство. При нефтенасыщении удельное электрическое сопротивление составляет 30...50 Ом·м, удельная электропроводность – 70...50 мСм/м, при водонасыщении – 5...15 Ом·м, 150...200 мСм/м и более, соответственно (рис. 5, А, Б).

Эти показания на каротажных диаграммах обычно служат основанием для установления границы водо- и нефтенасыщенных коллекторов (водонефтяного контакта). Однако известно немало случаев получения притоков безводной нефти в верхнеюрских коллекторах Малореченского, Западно-Останинского, Первомайского, Вахского, Онтонигайского и других месторождений из интервалов, отнесенных к водонасыщенным по показаниям электрометрического каротажа. Как показали проведенные ранее автором исследования [8], причиной аномальности геофизических характеристик нефтенасыщенных пластов, оцениваемых как водонасыщенные из-за низких значений электрического сопротивления, является присутствие в породах пирита. Последний, как известно, является полупроводником и обладает высокой электропроводимостью при повышенных температурах [2, 3].

В шлифах из нефтенасыщенных песчаников видны тонкодисперсные образования пирита в виде сыпи на обломках и в нефти, а также пленок на периферии пор, заполненных нефтью (рис. 6). Такие ассоциации нефти и пирита приурочены обычно к нижней части пласта, где повышается содержание остаточной воды, а на обломочных зернах, выходящих в поровое пространство, кристаллизуется тонкодисперсный пирит, благодаря восстановительному характеру среды при заполнении пор нефтью. Остаточная вода и пирит окружают нефтепроявления и создают цепь, пропускающую электрический ток. На записях электрокаротажных диаграмм регистрируется падение удельного электрического сопротивления.

В песчаниках однородной структуры углеводороды равномерно насыщают пустотное пространство (рис. 7, А); при плохой сортировке, неоднородном пустотном пространстве наблюдается избирательное нефтенасыщение (рис. 7, Б).

Наличие карбонатного материала однозначно проявляется увеличением значений на кривых КС и НГК. При порово-базальном кальцитовом цементе (рис. 7, В, Г) удельное электрическое со-

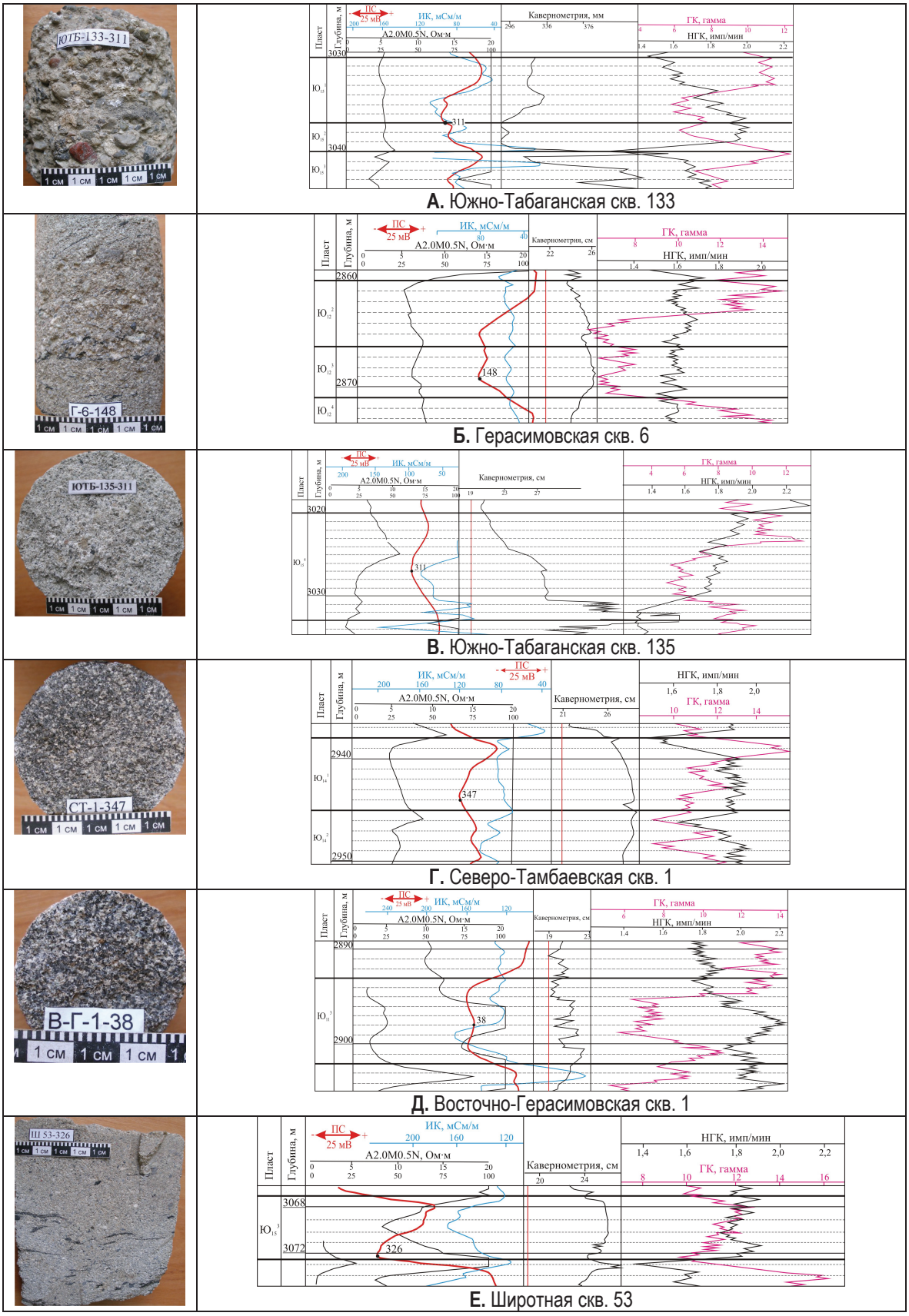
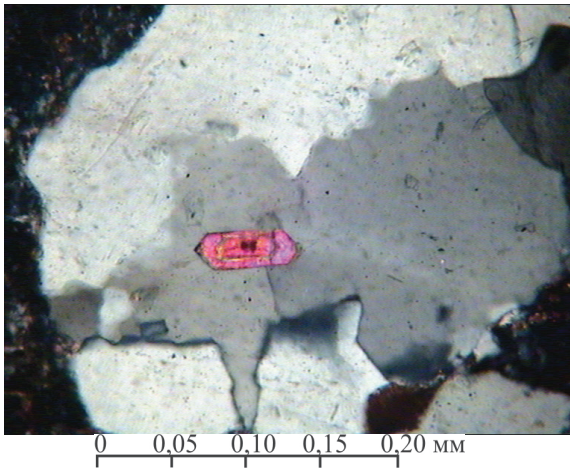
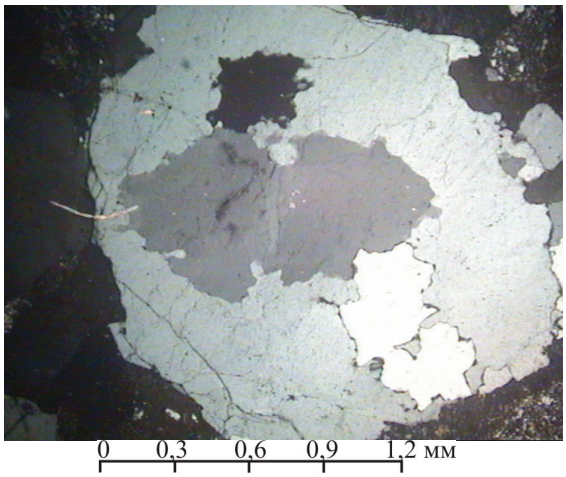


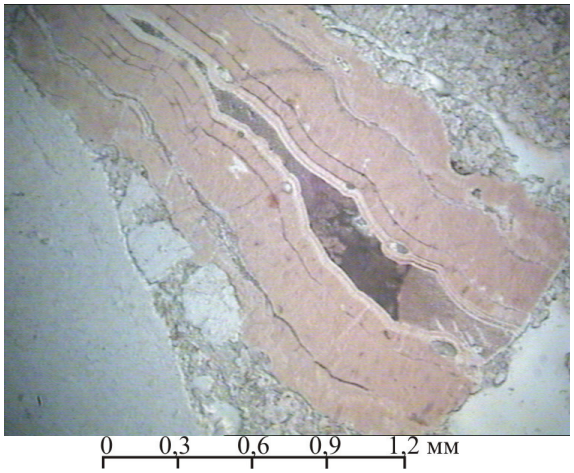
Рис. 2. *Геофизическая характеристика гравелитов*



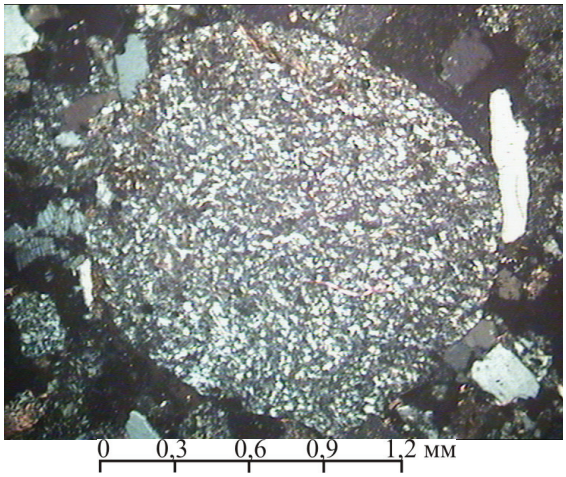
Кристалл циркона в кварце. 2 ник.
А. ВГ-1. Гл. 2895,0 м. $Ю_{11}^{3}$.



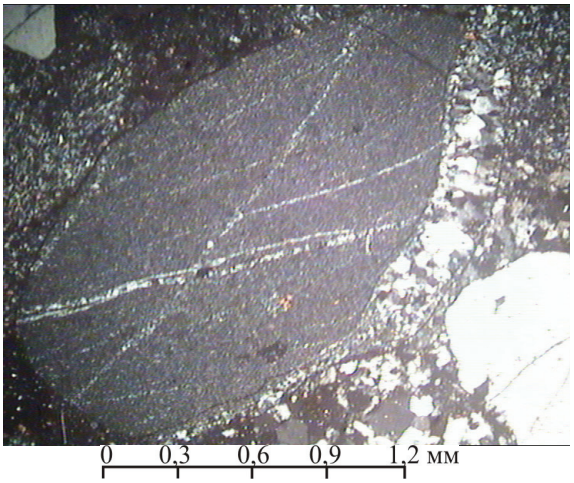
Окатанное зерно кварца с мозаичным погасанием. 2 ник.
Б. ЮТБ-133. Гл. 3037,0 м. $Ю_{15}^{1}$.



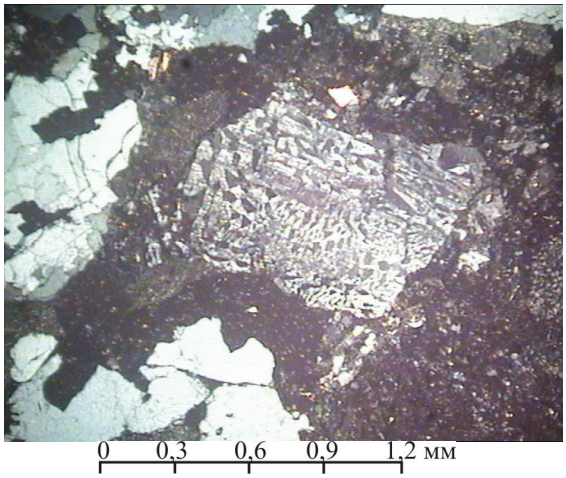
Фрагмент обломка халцедона. 1 ник.
В. ЮТБ-133. Гл. 3037,0 м. $Ю_{15}^{1}$.



Окатанный обломок кремнистой породы. 2 ник.
Г. Ш-53. Гл. 3073,0 м. $Ю_{15}^{3}$.

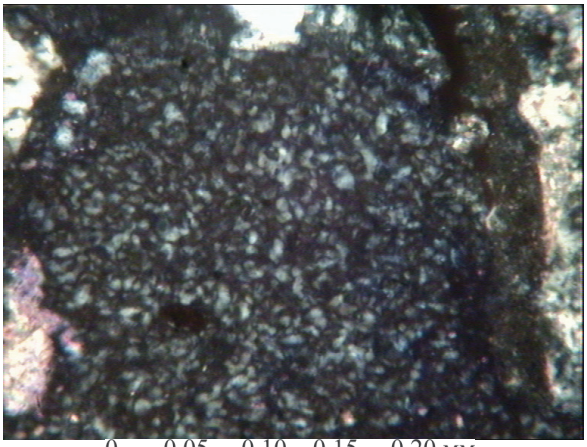


Обломок вулканического стекла с прожилками кварца. 2 ник.
Д. Г-6. Гл. 2869,0 м. $Ю_{12}^{2}$.

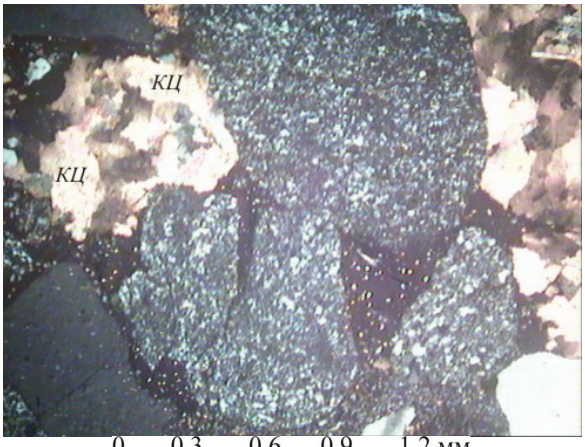


Обломок пегматита. 2 ник.
Е. ЮТБ-133. Гл. 3037,0 м. $Ю_{15}^{1}$.

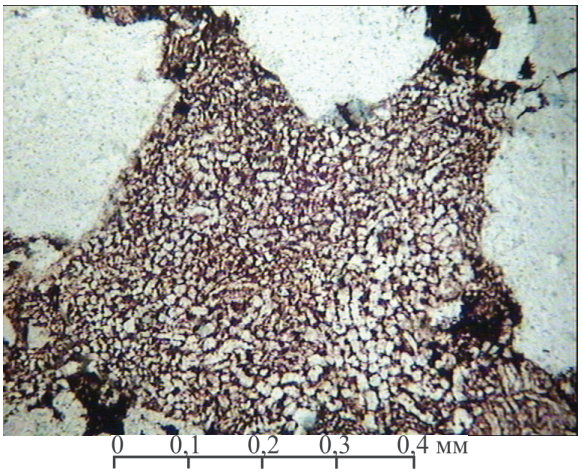
Рис. 3. *Обломки минералов и пород в гравелитах*

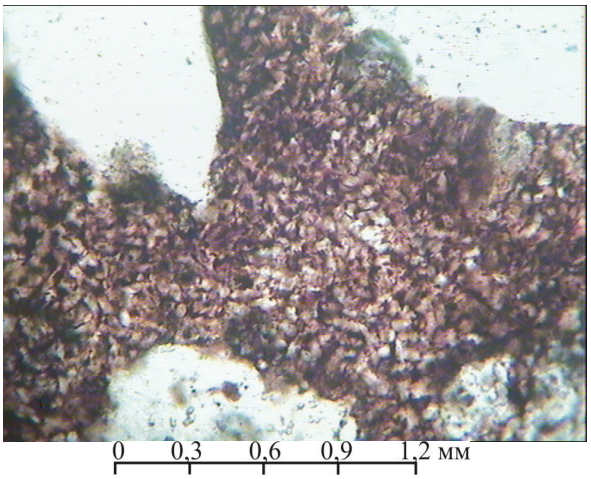


Поровый каолинитовый цемент. 2 ник.
А. ЮТБ-135. Гл. 3027,0 м. $Ю_{15}^{1}$.

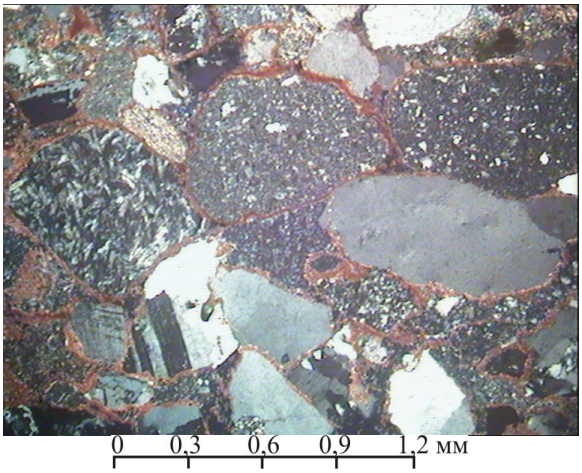


Поровый кальцитовый (*КЦ*) цемент. 2 ник.
Б. Г-6. Гл. 2869,0 м. $Ю_{15}^{2}$.

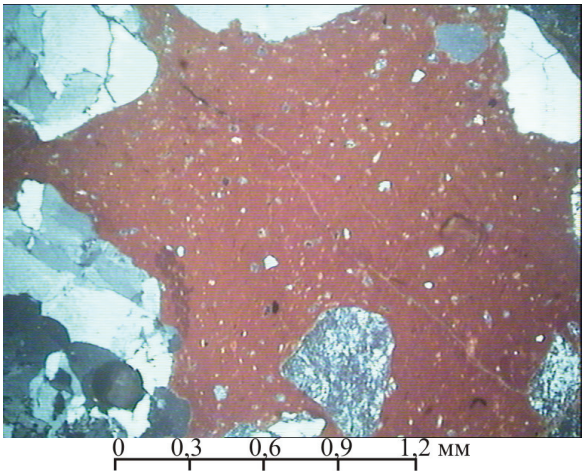




Нефтенасыщение в микропорах каолинита цемента. 1 ник.
В. ВГ-1. Гл. 2895,0 м. $Ю_{11}^{3}$.
Г. СТ-1. Гл. 2944,0 м. $Ю_{14}^{1}$.



Пленочный сидеритовый цемент. 2 ник.
Д. Ш-53. Гл. 3073,0 м. $Ю_{15}^{3}$.



Участок базального глинисто-железистого цемента. 2 ник.
Е. ЮТБ-133. Гл. 3037,0 м. $Ю_{15}^{1}$.

Рис. 4. *Цементы в гравелитах*

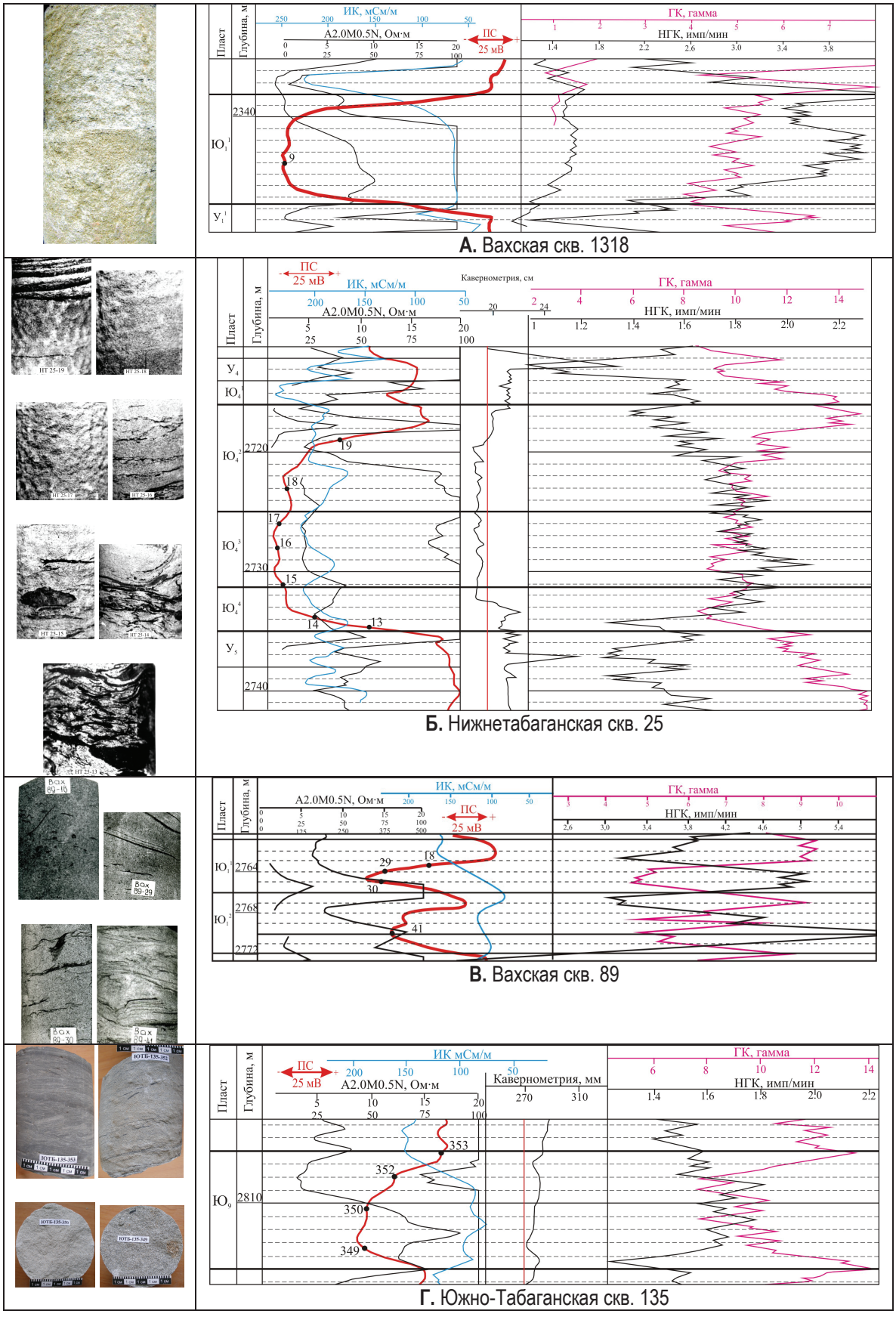


Рис. 5. *Геофизические характеристики песчаников*

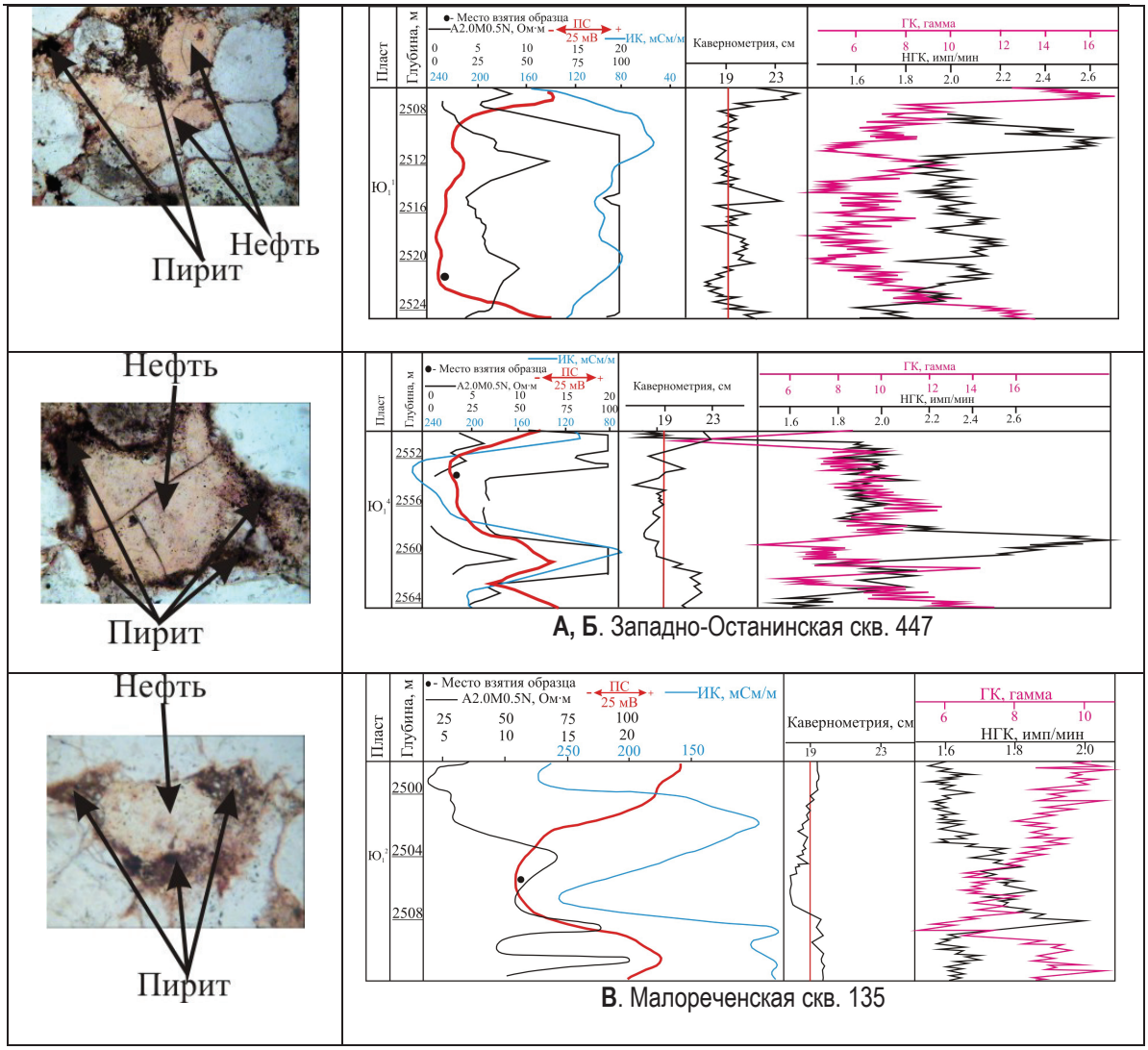


Рис. 6. *Аномальные геофизические характеристики нефтенасыщенных коллекторов*

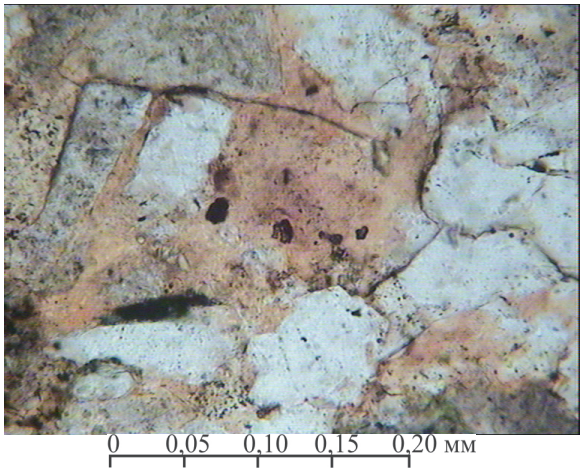
противление составляет 15...25 Ом·м и более на фоне значений 6...10 Ом·м, а величина НГК превышает 6,4 имп/мин (рис. 7, А).

Отмеченная закономерность увеличения значений НГК и КС в песчаниках с кальцитовым цементом нарушается в присутствии пирита. Такая специфическая порода, представленная песчаником с кальцитовым цементом, с обилием пирита и глауконита (рис. 7, Д, Е), наблюдается в верхней части юрского разреза (барабинская пачка кимериджского возраста). Повышенным значениям НГК (более 2,0 имп/мин) соответствуют резкое снижение сопротивления (5...6 Ом·м) и увеличение электропроводимости (150 мСм/м и более) (рис. 8, Б).

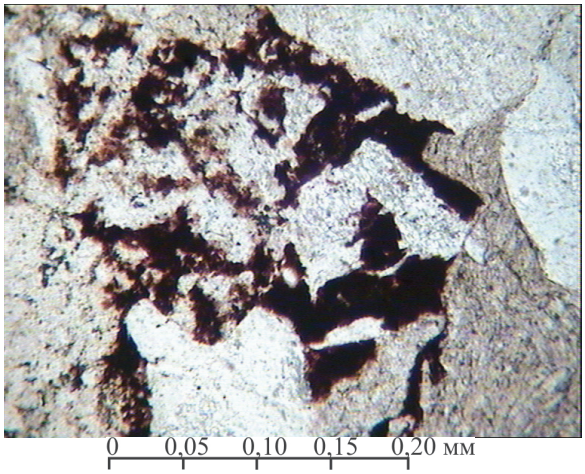
На кривых кавернометрии однородные песчаники характеризуются образованием глинистой корки на стенках скважины, т. е. уменьшением диаметра скважины равномерно по пласту (см. рис. 5, Б). Увеличение содержания глинистого цемента в песчаниках способствует уменьшению порового пространства и, соответственно, толщины глинистой корки (см. рис. 6, А).

Алевролиты – мелкообломочные породы, состоящие преимущественно из обломков минералов размеров от 0,01 до 0,1 мм. Среди них выделяются крупнозернистые (0,1...0,05 мм) и мелкозернистые (0,05...0,01 мм) разности.

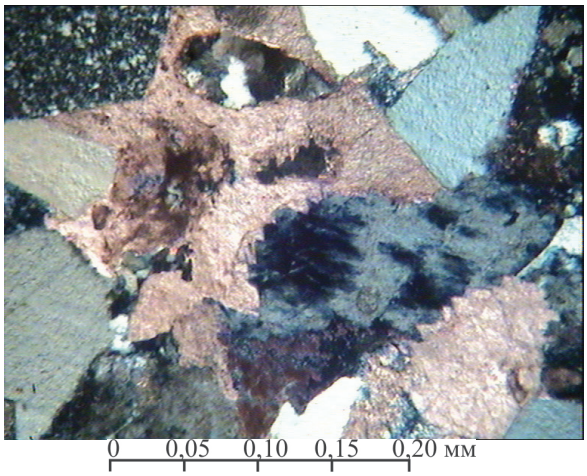
Геофизическая характеристика алевролитов (рис. 9) зависит от содержания в них песчаных или глинистых частиц, а также от состава цемента. В первом случае кривая ПС имеет слабую отрицательную аномалию (до 10 мВ), при глинизации – недифференцирована. Значения удельного электрического сопротивления обычно составляет 7...10 Ом·м, удельной электропроводимости – до 200 мСм/м. На диаграммах радиоактивного каротажа величина интенсивности излучения не превышает 1,8 имп/мин, а значения радиоактивности колеблется в пределах 10...16γ.

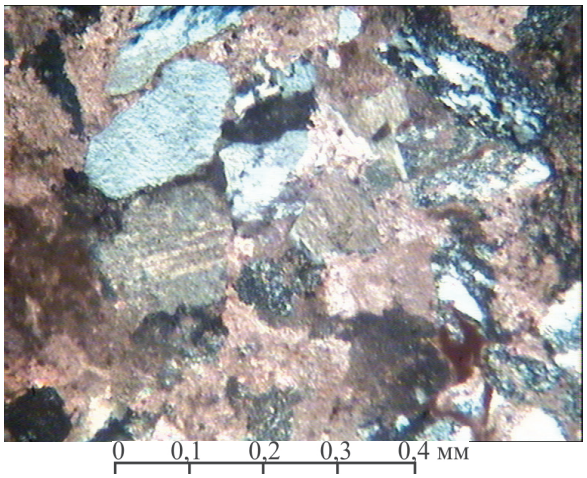


Равномерное нефтенасыщение порового пространства. $Ю_1^1$.
А. Вах-1318. Гл. 2344,0 м. 1 ник.

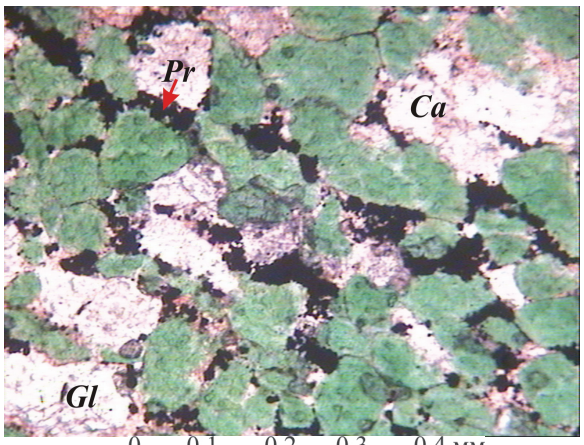


Неравномерное внутризерновое нефтенасыщение. $Ю_9^2$.
Б. Г-444. Гл. 2806,0 м. 1 ник.

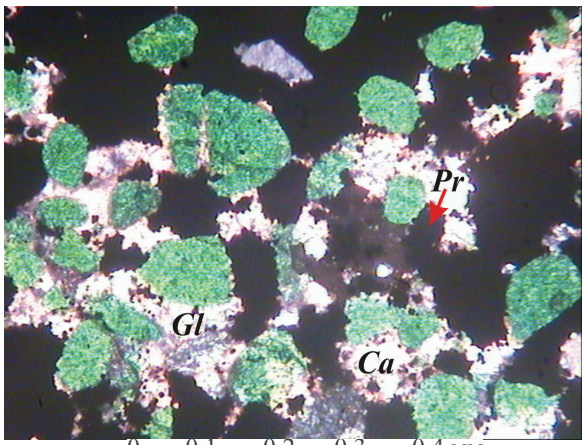




Порово-базальный коррозионный кальцитовый цемент. 2 ник.
В. З-Луг. 521. Гл. 3021,45 м. $Ю_9^1$.
Г. З-Луг. 521. Гл. 3028,75 м. $Ю_9^2$.



Д.



Е.

Глауконит (Gl), пирит (Pr) и кальцит (Ca) в песчаниках. 1 ник.
Герасимовская скв. 19. Гл. 2560,0 м. Барабинская пачка.

Рис. 7. *Строение песчаников*

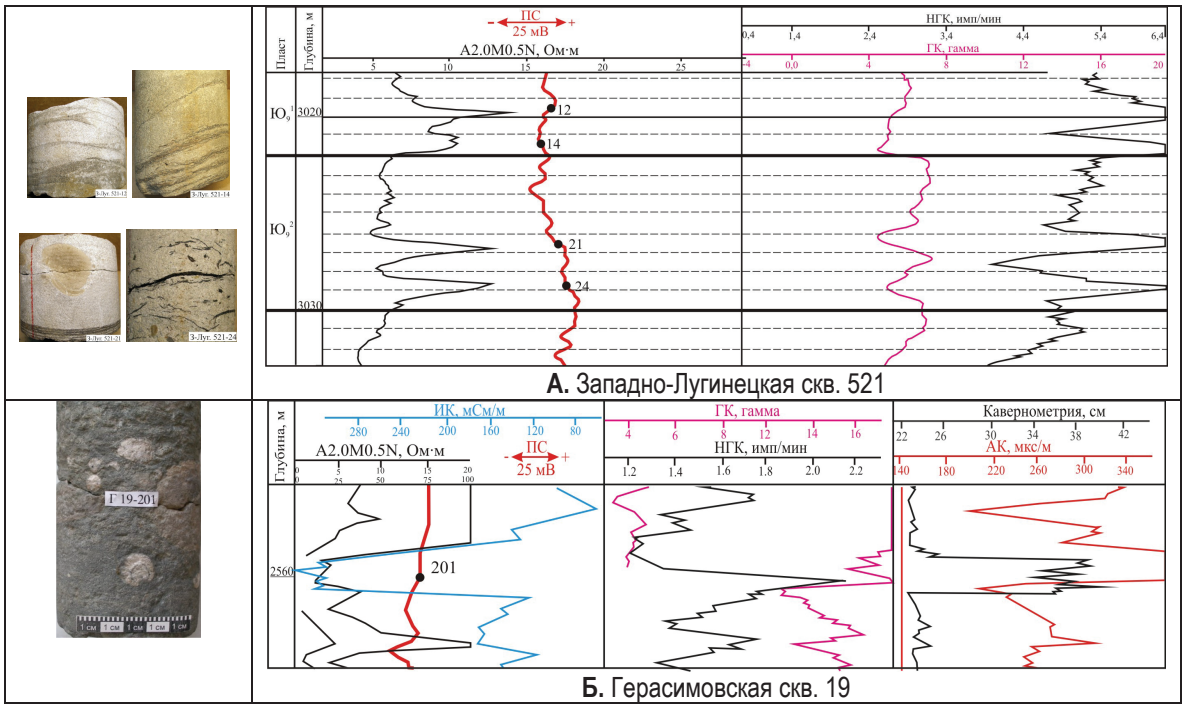


Рис. 8. *Геофизическая характеристика песчаников с кальцитовым цементом*

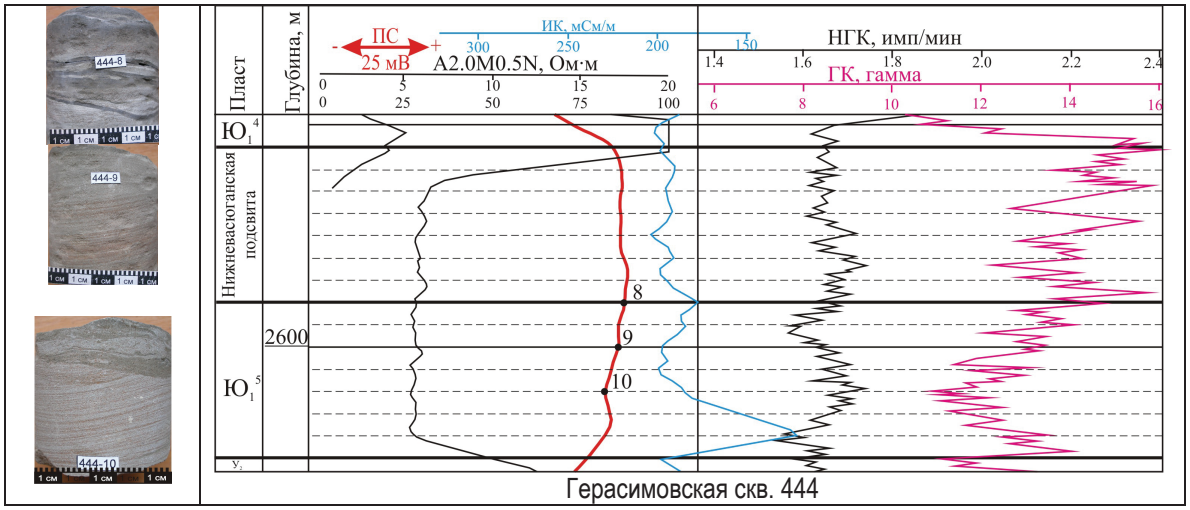


Рис. 9. *Геофизическая характеристика алевролитов*

Выводы

1. Гравелиты характеризуются неглубокой отрицательной аномалией собственной поляризации, увеличением диаметра скважины, невысокими значениями радиоактивности, средними значениями на кривых нейтронного каротажа. Относительно крупные обломки окатаны, цементы имеют полиминеральный состав.
2. Крупно- и среднезернистые отсортированные песчаники характеризуются глубокой отрицательной аномалией собственной поляризации. При уменьшении размеров зерен, ухудшении сортировки и наличии глинисто-углистых прослоев ширина аномалии уменьшается.
3. Значения кажущегося сопротивления и индукционного каротажей определяется составом флюидов, насыщающих пустотно-поровое пространство. Аномальное падение сопротивления в нефтенасыщенных коллекторах ряда месторождений объясняется наличием тонкодисперсного пирита, образующего пленки по периферии пор, заполненных нефтью.
4. Наличие карбонатного материала в цементе песчаников отражается увеличением значения

удельного электрического сопротивления и интенсивности излучения на кривых нейтронного каротажа. В присутствии пирита электропроводимость увеличивается.

5. На кривых кавернометрии однородные песчаники характеризуются образованием глинистой корки на стенках скважины; увеличение содержания глинистого цемента и ухудшение сортировки приводит к уменьшению порового пространства и уменьшению толщины глинистой корки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. – М.: Недра, 1982. – 448 с.
2. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. – М.: Недра, 1985. – 310 с.
3. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин: Справочник / под ред. В.М. Добрынина. – М.: Недра, 1988. – 476 с.
4. Карогодин Ю.Н., Гайдебурова Е.А. Системные исследования слоевых ассоциаций нефтегазоносных бассейнов (по комплексу промыслово-геофизических данных). – Новосибирск: Наука, 1989. – 108 с.
5. Латышова М.Г. Практическое руководство по интерпретации диаграмм геофизических методов исследования скважин. – М.: Недра, 1982. – 182 с.
6. Ежова А.В. Индексация и корреляция средневерхнеюрской продуктивной толщи Казанского и Пудинского нефтегазоносных районов // Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 2001. – С. 88–94.
7. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования). – М.: Высшая школа, 1984. – 416 с.
8. Ежова А.В. Методика оценки нефтенасыщенности низкоомных коллекторов в юрских отложениях юго-востока Западно-Сибирской плиты // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 23–26.

Поступила 01.03.2011 г.

УДК 552.578.2.061.33

ПРИРОДА НАКЛОННЫХ ВОДОНЕФТЯНЫХ КОНТАКТОВ ВЕРХНЕЮРСКИХ НЕФТЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ КАЙМЫСОВСКОГО СВОДА

А.Ю. Хромовских

ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск
E-mail: KhromovskikhAY@nipineft.tomsk.ru

Установлено, что основными факторами, регулирующими распространение углеводородов, мигрировавших из баженовской свиты непосредственно в пределах верхнеюрских залежей, являются региональный гидродинамический напор пластовых вод и капиллярное давление в породах-коллекторах.

Ключевые слова:
Миграция углеводородов, коллектор, залежь, гидродинамический напор пластовой воды, капиллярное давление.

Key words:
Hydrocarbon migration, reservoir rock, accumulation, hydrodynamic thrust, capillary pressure.

Изучению проблемы наклонного водонефтяного контакта углеводородных залежей Западной Сибири в последнее время уделяется достаточно много внимания. Существует несколько вариантов, объясняющих причины этого явления. Среди большинства исследователей наибольшее распространение получили два варианта формирования залежей с наклонным контактом за счёт гидравлических напоров пластовых вод и сил капиллярного сопротивления.

В основе обоих вариантов лежит представление о формировании залежей путём латеральной миграции углеводородов в ловушки из зон их генерации. Принято считать, что движение углеводородов по породам-коллекторам в процессе вторичной миграции, а также последующее формирование залежей, контролируются тремя силовыми факторами. К этим факторам относятся: капиллярное давление, гидродинамический напор флюидов и гравитационная сегрегация углеводородов. Миграция углеводородов как по латерали, так и по вертикали возможна, если приложенное к нефти и газу избыточное давление, определяющее их перенос, превзойдет капиллярное давление в породах, препятствующее миграции. Чаще всего это избыточное давление определяется региональным гидродинамическим напором и гравитационной сегрегацией углеводородов.

Не вдаваясь в анализ обоснованности этих вариантов для всего разреза нефтегазоносности Западно-Сибирского региона, попытаемся оценить возможность их применения для верхнеюрских залежей в его юго-восточной части. Исходя из вышеуказанных представлений [1–5], рассмотрим варианты формирования залежей с наклонным водонефтяным контактом (ВНК) на примере месторождений Каймысовского свода (рис. 1), нефтеносность которых, в основном, связана с отложениями верхней юры.

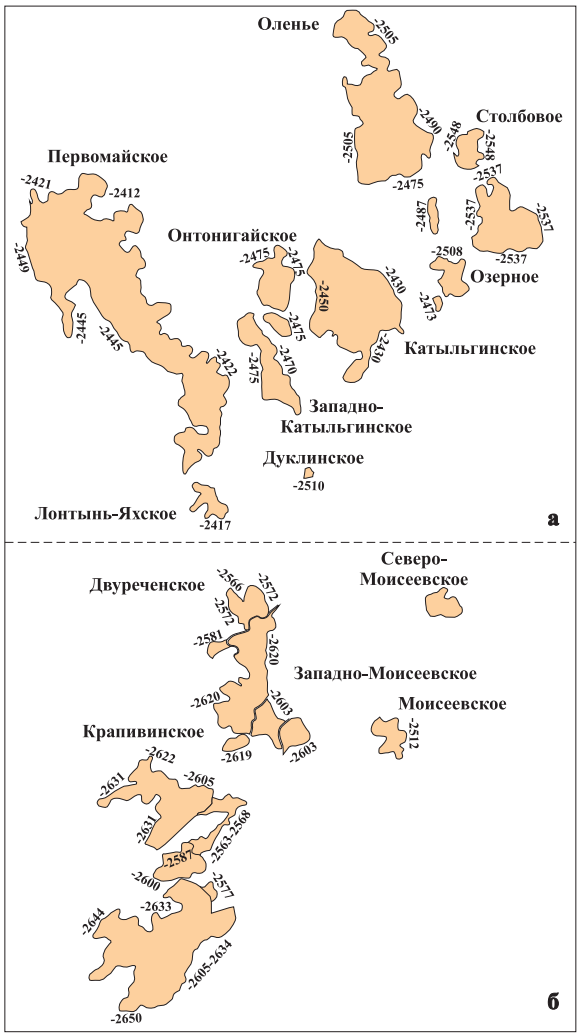


Рис. 1. *Изменения уровней водонефтяных контактов на месторождениях Каймысовского свода: а) северная; б) южная часть*

Распространение месторождений по территории исследования обусловлено, в основном, строением разреза горизонта $Ю_1$ [6]. В северной части свода нефтяные залежи приурочены к отложениям надугольной толщи, в разрезе которой получили широкое распространение песчаные пласты $Ю_1^0$, $Ю_1^1$ и $Ю_1^2$. Промышленная нефтеносность южной части территории исследования связана с коллекторами надугольной и подугольной толщ горизонта $Ю_1$. При этом в надугольной толще песчаники пластов $Ю_1^1$ и $Ю_1^2$ имеют ограниченное распространение, и основные запасы нефти месторождений сосредоточены в песчаных пластах $Ю_1^3$ и $Ю_1^4$ подугольной толщи.

Высокая степень изученности геологического строения территории ставит под сомнение ранее распространённое представление о формировании месторождений Каймысовского свода за счет латеральной миграции углеводородов из погруженных зон прилегающей с востока Нюрольской впадины. Имеющаяся информация не позволяет утверждать о высокой степени генерации углеводородов баженовской свиты на территории Нюрольской впадины. Поэтому возможность миграции углеводородов из её территории в структурные ловушки Каймысовского свода и создание там нефтяных залежей маловероятны. Кроме этого в погруженных участках впадины и крыльевых зонах положительных структур чаще всего отсутствует надёжный коллектор, исполняющий как роль аккумулятора углеводородов, поступающих из вышележащих нефтематеринских отложений баженовской свиты, так и проводника, способного обеспечить вторичную миграцию углеводородов к ловушкам. Позднеюрский коллектор этих территорий, даже в случае своего присутствия, как правило, имеет проницаемость, составляющую первые единицы $мкм^2 \cdot 10^{-3}$, а степень его фациальной изменчивости по площади очень велика [7].

Поэтому, по вышеизложенным причинам, никакая латеральная миграция углеводородов практически невозможна, несмотря на то, что гидродинамический напор пластовых вод на изучаемой территории имеет основное направление со стороны Нюрольской впадины – с востока на запад и с юга на север.

Маловероятна также миграция капель и пузырьков углеводородов в поровом пространстве коллектора за счет гравитационной сегрегации углеводородов. Элементарные расчеты показывают [2], что при максимальных углах наклона пластов 2...3° и проницаемости, составляющей первые единицы и десятки $мкм^2 \cdot 10^{-3}$, капиллярные силы в сотни и тысячи раз превышают движущие силы гравитационной сегрегации и создают непреодолимые барьеры на пути движения углеводородов.

Такого же мнения придерживаются многие исследователи, такие как У. Рассел, А. Леворсен, И.И. Нестеров, В.А. Соколов и др., которые полагают, что движение дисперсной фазы углеводородов, особенно нефти, в абсолютном большинстве пород-коллекторов, типичных для природных резервуаров, невозможно. По их мнению, для миграции изолированных капель нефти и пузырьков газа требуются силы в несколько тысяч раз больше, чем силы, образуемые нормальными гидродинамическими градиентами.

Существует представление [7], что формирование позднеюрских нефтяных залежей обусловлено первичной миграцией углеводородов в песчаные коллекторы горизонта $Ю_1$ из вышележащих отложений баженовской свиты, в основном, в пределах

имеющихся контуров нефтеносности. В процессе первичной миграции углеводородные молекулы находятся в виде гомогенной смеси с молекулами поровой воды без разделения на фазы. Вследствие этого, из нефтегазоматеринской толщи они беспрепятственно перемещаются вместе с отжимаемыми поровыми водами в режиме файлюации за счет повышенного в процессе генерации внутрипорового давления и литостатического давления поровых флюидов. Направлением движения потока является зона разгрузки давления (пористая или трещиноватая среда).

Заполнение порового пространства коллектора нефтью происходит селективно, и, в первую очередь, аккумуляция её идёт в зонах дисперсных пород с повышенной трещиноватостью или высокой пористостью, обусловленной наличием в породе крупных пор. Силами, препятствующими миграционному процессу углеводородов в направлении сверху вниз, являются капиллярное давление в породах и гравитационная сегрегация углеводородов.

Региональный гидродинамический напор пластовых вод играет неоднозначную роль при формировании нефтяных залежей. На вертикальную миграцию гомогенной смеси углеводородных флюидов и поровой воды в коллекторе по направлению сверху вниз дополнительно действует гидродинамический напор пластовых вод вдоль пласта. Взаимодействие вертикального и горизонтального напоров и обосновывают степень проникновения углеводородов в поровое пространство коллектора. В крыльевых участках ловушек, со стороны повышенного значения гидродинамического напора, проникновение углеводородов будет меньше, так как напор оказывает сопротивление вертикальной миграции из отложений баженовской свиты. Совершенно другая картина наблюдается на противоположных крыльях. Там гидродинамический напор меньше, и это благоприятствует распространению гомогенной смеси углеводородных флюидов и поровой воды в погруженные зоны крыльев структуры. Поэтому в северо-западных и западных частях ловушек нефть из баженовской свиты проникала гипсометрически ниже, чем в восточных и юго-восточных частях.

Помимо основного фактора, которым является региональный гидродинамический напор пластовых вод, определённую роль в формировании наклонного ВНК играют фильтрационно-емкостные свойства коллекторов, подстилающих нефтематеринские отложения баженовской свиты.

В северной части свода это наглядно видно на примере Первомайского месторождения (рис. 2). В северной и северо-восточной частях месторождения вопреки общей закономерности понижения ВНК за счет регионального гидродинамического напора наблюдается гипсометрически высокое его положение (абс. отм. –2412...2421 м). Причина этого явления кроется в характеристике коллекторов надугольной пачки горизонта $Ю_1$, в который осуществляется миграция углеводородов. Если на большей части территории месторождения песчаники имеют суммарную эффективную толщину 8...12 м, то в северном и северо-восточном направлениях наблюдается уменьшение эффективной толщины коллекторов до 2...3 м и ухудшение их фильтрационно-емкостных свойств за счет глинизации. Именно повышенное капиллярное давление в глинистых коллекторах с плохой проницаемостью явилось дополнительным сопротивлением, вызвавшим ослабление скорости миграции углеводородов на данной территории из вышележащей баженовской свиты, несмотря на благоприятные условия гидродинамического напора пластовых вод.

Подобная картина наблюдается и в южной части Каймысовского свода на основной залежи (пласт $Ю_1^3$) Двуреченского месторождения. Здесь на общем фоне закономерного понижения ВНК с юга на север от –2602 до –2620 м в северной его части абсолютные отметки изменяются в пределах –2566...2581 м.

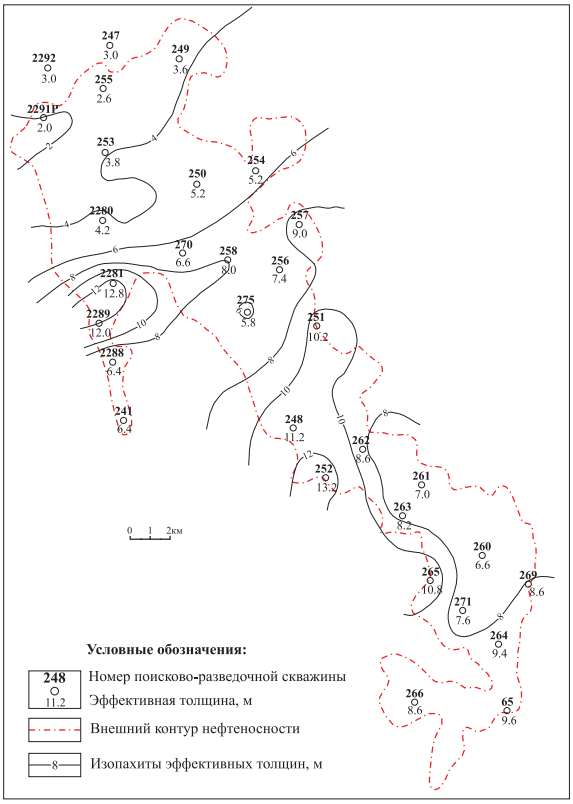


Рис. 2. *Карта эффективных толщин коллекторов надугольной толщи горизонта $Ю_1$ Первомайского месторождения*

Основная причина этого кроется в распространении в этой части месторождения коллекторов с пониженными фильтрационно-емкостными свойствами, у которых проницаемость уменьшена почти на два порядка по сравнению с коллекторами основной части месторождения. Это обусловлено фациальными условиями формирования пласта $Ю_1^3$. Низкопроницаемые коллекторы образовались

в процессе неоднократного быстрого выдвижения береговой линии моря в северо-западном направлении. В таких условиях не происходило активного вымывания глинистого материала, в результате чего образовались уплотнённые породы. Отмечается латеральное чередование зон низкопроницаемых и проницаемых песчаников, имеющих северо-восточную ориентировку. Поэтому за счет разной проницаемости зон, а соответственно и разной скорости миграции наблюдается разный уровень проникновения углеводородов из баженовской свиты в нижележащий коллектор.

Такое же явление разного уровня ВНК наблюдается и на Крапивинском месторождении, расположенного к югу от Двуреченского месторождения. Здесь коллекторы пласта $Ю_1^3$ формировались в схожей обстановке. Кроме этого в пределах нефтяной залежи, в зонах распространения низкопроницаемых песчаников, на гипсометрически высоких уровнях имеют место водонасыщенные коллекторы. Это вызвано ослаблением скорости миграции углеводородов из баженовской свиты или полным её отсутствием. Причина этого кроется в дополнительном сопротивлении процессу миграции за счет повышенного капиллярного давления в глинистых коллекторах.

Выводы

Под действием гидродинамического напора пластовых вод нефть из баженовской свиты в северо-западных и западных частях залежей Каймысовского свода проникала гипсометрически ниже, чем в восточных и юго-восточных.

Неоднородная по площади и разрезу фильтрационно-емкостная характеристика коллектора является причиной разных скоростей заполнения отдельных участков залежи углеводородами, мигрировавших из вышележащих отложений баженовской свиты. Вследствие этого в нефтяных залежах, где процесс формирования незакончен и продолжается по настоящее время, границы заполнения порового пространства коллектора углеводородами в различных частях залежи находятся на разных гипсометрических уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков Ю.Я. Теория капиллярности нефтегазонакопления. – Новосибирск: Наука, 1995. – 184 с.
2. Голященко А.В. Поиск и разведка нефтяных залежей с наклонным водонефтяным контактом // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 8. – С. 50–52.
3. Дальберг Э.Ч. Использование данных гидродинамики при поисках нефти и газа. Пер. с англ. Е.В. Кучерука. – М.: Недра, 1985. – 149 с.
4. Иванов И.А., Конторович А.Э., Степаненко Г.Ф. Роль капиллярных экранов в формировании и сохранении залежей углеводородов. Нетрадиционные источники углеводородного сырья и проблемы его освоения. – СПб.: ВНИГРИ, 1992. – 200 с.
5. Трушкин В.В. Физические и геологические основы изучения движения вод в глубоких горизонтах. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 156 с.
6. Хромовских А.Ю., Волощук Г.М. Особенности формирования верхнеюрских нефтяных залежей юго-востока Западно-Сибирской плиты. – Томск: Изд-во ТПУ. 2011. – 103 с.
7. Khromovskikh A.Y., Zapivalov N.P. Migration behavior during late Jurassic oil deposit formation in Kaymisovsk Arch, West Siberia // Drilling&exploration Dew Journal. – 2011. – V. 20. – P. 35–40.

Поступила 23.09.2011 г.

УДК 550.84:551.8

ГЕНЕЗИС НЕФТЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕЛЫЙ ТИГР (ВЬЕТНАМ) ПО ДАННЫМ О СОСТАВЕ НАСЫЩЕННЫХ АЦИКЛИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

О.В. Серебренникова*, Ву Ван Хай, Ю.В. Савиных*, Н.А. Красноярова*

Томский политехнический университет
*Институт химии нефти СО РАН, г. Томск
E-mail: vuvanhai19852004@yahoo.com

Описаны общие характеристики состава рассеянного органического вещества пород миоцена и олигоцена в пределах месторождения Белый Тигр (Вьетнам) и сопоставление его с соответствующими характеристиками нефтей.

Ключевые слова:
Металлопорфирины; рассеянные органические вещества; порфирины; катагенез; фитопланктон.

Key words:
Metalloporphyrins, dispersed organic matter, porphyrin, catagenesis, phytoplankton.

Месторождение Белый Тигр (Bach Ho) расположено на южном шельфе СР Вьетнама в блоке 09–1 в 120 км к юго-востоку от города-порта Вунгтау, основной производственно-технической и снабженческой базы СП «Вьетсовпетро» (рис. 1). Найдены залежи нефти в нижнемиоценовых и олигоценовых песчано-алевролитовых отложениях, а также, вопреки предварительным ожиданиям в трещиноватых гранитоидных коллекторах фундамента. Отнюдь не часто встречающийся случай обнаружения промышленных скоплений нефти в кристаллических породах привлекает особое внимание. Месторождение Белый Тигр стало самым крупным месторождением нефтносной провинции, приуроченным к центральному поднятию Кыулонгской впадины.

Для восстановления истории формирования в недрах Земли углеводородных скоплений, реконструкции условий нафтидогенеза необходимо детальное исследование состава рассеянного в породах органического вещества, в частности распределения в нем хемофоссилий, унаследовавших черты своего строения от биологических предшественников. Состав этих структур определяется, прежде всего, исходной биомассой и последующими этапами ее преобразования [1].

Комплекс хемофоссилий (индивидуальный состав изопреноидных и нормальных алканов, содержание металлопорфиринов и перилена), а также состав фенатренов, выбранный нами для исследований, позволяют судить о фациально-генетической природе присутствующего в породах органического вещества. Так, присуствие в органического вещества комплексов порфиринов с ванадилом (VO-p) указывает на премущественно морской генезис органического вещества и восстановительные условия при осадконакоплении. Наличие никелевых порфиринов (Ni-p) свидетельствует об отсуствии сероводородного заражения природных вод при седиментации и раннем диагенезе органического вещества. Прилен, широко распространенный в озерах, встречается также в прибрежных районах морей и отсутсвует в глубоководных фациях. Соотношение изопреноидных углеводородов пристана (П) и фритана (Ф) может быть использовано для оценки окислительно-востановительных условий в бассейне седиментации. Следует, однако, учитывать, что наряду с окислительной средой повышенное содержание пристана в осадках может быть обусловлено существенным вкладом в органическом веществе зоопланктона и биомассы бактерий. Состав н-алканов характеризует участие в формировании состава органического вещества отдельных групп биопродуцентов. Основными углеводородами фитопланктона являются C_{15} и C_{17} н-алканы. Для наземой растительности характерно преобладание C_{27}, C_{29} и C_{31} н-алканов. В прибрежно-морских водорослях преобладают C_{21}, C_{23} и C_{25} гомологи [1].

Для определения степени термической зрелости органического вещества нами использованы CPI – отношение концентрации н-алканов с нечетным числом атомов углерода в молекуле к «четным» н-алканам, а также расчетная отражательная способность витринита (Rc), основанная на различии в термической стабильности отдельных изомеров метилфенатренов. Rc хорошо коррелирует с отражательной способностью витринита (% Rm) в интервале его значений, соотвествующих основной зоне образования нефти из керогена.

Накопленный к настоящему времени материал об особенностях состава рассеянного органического вещества и нефтей месторождения Белый Тигр показал, что геохимические параметры углеводородов-биомаркеров для рассеянных органических веществ пород и нефтей фундамента имеют большие отличия. Полученные данные свидетельствуют, что породы фундамента не имеют никакого отношения к генерации нефти, заполняющей каверны в фундаменте [3]. Важную роль для нефтеобразования на месторождении Белый Тигр играют породы нижнего олигоцена и верхнего олигоцена и нижнего миоцена и эоцена [11]. Анализ состава нефтей месторождения Белый Тигр показал наличие двух групп нефтей различного генезиса. Первый – нефти из фундамента и олиноцена, а второй – из миоцена [4].

Целью настоящего исследования являлась характеристика состава рассеянного органического вещества пород миоцена и олигоцена в пределах месторождения Белый Тигр (Вьетнам) и сопоставление его с соответствующими характеристиками нефтей.

Характеристика объектов и методов исследования

Экстракцию битумоида проводили 7 %-м раствором метанола в хлороформе при помощи Tecator Coxtec HT–сиситемы. Фенантрены, перилен и металлопорфирины были сконцентрированы хроматографическим разделением битумоида на колонках с оксидом алюминия. Содержанием металлопорфиринов и перилена в хроматаграфических фракциях определено методом электронной спектроскопии по интенсивности полос поглощения при λ=550 нм (для Ni-p), 570 нм (для VO-p) и 435 нм (для реримелена) с использованием в расчетах коэффициентов экстинкции $2{,}7\cdot10^4$, $2{,}9\cdot10^4$, $4\cdot10^4$ л/(мол.см), соответственно. Состав и распределение алканов и фенатренов исследовали методом газожидкостной хроматаграфии (ГЖХ) с использованием стационарной фазы SE-54 и пламенно-ионизационного дектетора. Индетификация соединений осуществлялась по времени удерживания путем сравнения с уже имеющимися, а также опубликованными данными. По хроматаграммам газожидкостной хроматаграфии были определены максимумы молекулярно-массового распределения н-альканов, расчитаны параметры состава алканов: отношение П/Ф, П/н-C_{17}, Ф/н-C_{18} и CPI, по составу фенатренов – метифенатреновый индекс MPI=1,5 (2MP+3MP)/(P+1MP+9MP) и Rc – расчетная отражательная способность витринита (Rc=0,6MPI+0,4).

Результаты и их обсуждение

Характеристика потенциально нефтематеринских пород месторождения Белый Тигр. В подавляющем большинстве образцов пород (кроме керна миоцен-1) обнаружены VO-p в невысоких концентрациях (от 3 до 31 нмол/г), Ni-p отсутствуют в образцах миоцен-1 (табл. 1). В то же время, породы миоцена и олигоцен-3 содержат хлориновые пигменты, сохранению которых в осадках способствует сероводородное заражение. Это может быть причиной отсутствия в них порфириновых комплексов с никелем. Органическое вещество таких пород, как правило, обогащено ванадием, ванадиловыми порфиринами, а также сероорганическими соединениями.

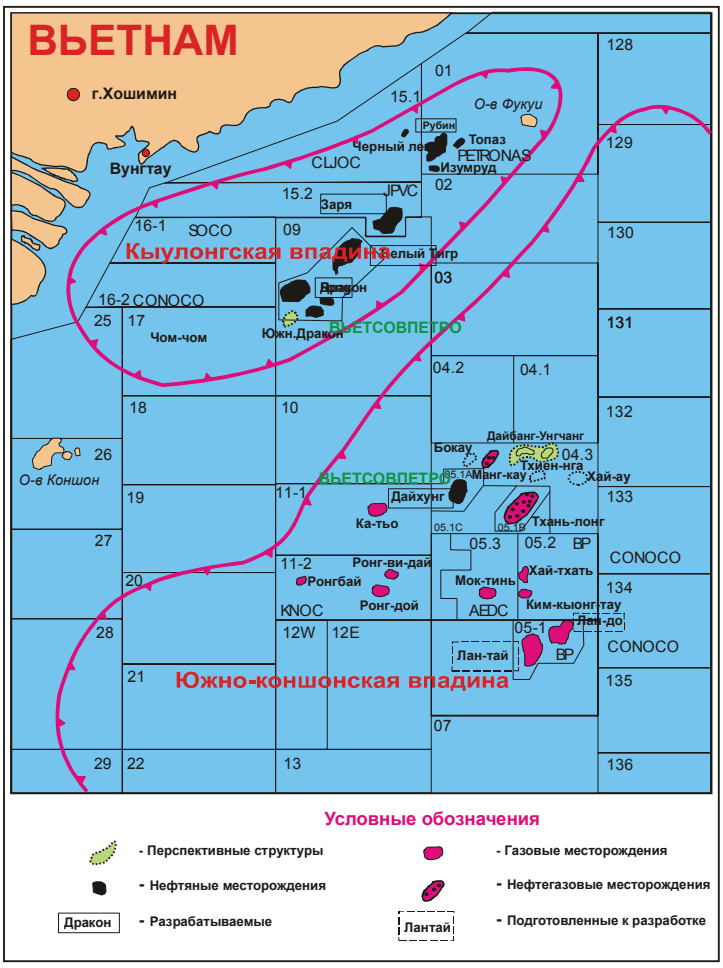


Рис. 1. *Обзорная карта района на шельфе юга Вьетнама*

Таблица 1. *Содержание металлопорфиринов и перилена в породах месторождения Белый Тигр*

Керн	Вьетнам			
	Мио-цен 1	Мио-цен 2	Олиго-цен 1	Олиго-цен 2
Глубина, м	2822,75	2992,75	4098,5	4142,5
Содержание перилена, нмол/г	0	199	0	0
Содержание Ni-р, нмол/г	0	65	3	9
Содержания VO-р, нмол/г	0	31	3	6
П/Ф	1,24	3,31	1,16	1,58
П/н-С17	0,28	0,53	0,44	0,37
Ф/н-С18	0,41	0,33	0,41	0,36
CPI-1/(C20-C28)	1,05	1,11	1,09	1,02
CPI-2/(C22-C30)	1,13	1,21	1,08	1,10
CPI-2/(C24-C32)	1,06	1,35	1,12	1,14
CPI(C12-C34)	1,01	1,07	1,06	1,07
MPI	0,61	0,62	0,83	0,66
Rc	0,76	0,77	0,89	0,79

Распределение парафиновых углеводородов в органичесом веществе месторождения Белый Тигр представлено на рис. 2. В большинстве среди н-алканов преобладают углеводороды состава C_{10}–C_{20}, в то время как концентрация н-алканов состава C_{21}–C_{35} заметно меньше. Характер молекулярно-массового распределения н-алканов в ОВ пород нижнего интервала олигоцена (4142,5 м) свидетельствует о смешанном характере исходного органического вещества, продуцированного фитопланктоном, прибрежными и наземными растениями в близком соотношении (рис. 2). Органический материал отлагался в субокислительных (П/Ф=1,58) условиях, видимо прибрежно-морского бассейна. Выше по разрезу (4098,5 м) вклад прибрежных водорослей снизился, а основными биопродуцентами были фитопланктон и древесные растения, накапливавшиеся в восстановительной среде (П/Ф=1,16). В миоцене (2992,75 м) обстановка осадконакопления сменилась на окислительную (П/Ф=3,31), среди биопродуцентов практически исчезли представители флоры, а доминировали микробные липиды. Наличие в органическом веществе перилена указывает на мелководность бассейна седиментации. Со временем (породы с глубины 2822,75 м) условия осадконакопления сменились на восстановительные, а биопродуценты – на фитопланктон и в подчиненном количестве прибрежные водоросли.

Во всех образцах кернового материала, CPI близко единице (1,01...1,07) В известной степени дополнением к данным Е. Берея и Е. Эванса могут служить материалы Дж. Купера, показывающие, что исходное ОВ пород месторождения Белый Тигр характеризовалось преобладанием жирных кислот с четным числом атомов углерода. Дж. Хант и М. Кальвин отмечают, что это соотношение нч/ч составляет для водорослей 1,01...1,07 [5]. В целом значения CPI в исследованных образцах отвечают органическое вещество достаточно зрелому для нефтеобразования.

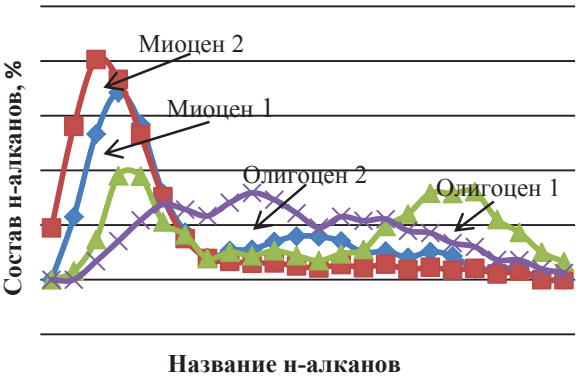


Рис. 2. *Молекулярно-массовое распределение н-алканов в рассеяных органических веществах месторождения Белый Тигр*

Таким образом, в олигоцен-миоценовом разрезе месторождения Белый Тигр присутствуют разности пород, существенно различающиеся седиментогенезом и составом биопродуцентов, поставлявших в осадок органического вещества. По своей термической преобразованности органического вещества месторождения Белый Тигр может быть охарактеризовано как зрелое, способное генерировать нефть. Об этом свидетельствуют величины расчетной отражательной способности витринита, соответствующие стадии катагенеза $МК_2$-$МК_3$, значения CPI и соотношения изопреноидных и н-алканов.

Характеристики нефтей месторождения Белый Тигр. Нефти этого месторождения является высоко парафинистыми (18...25,3 %), с очень низким содержанием серы. По глубине плотность и вязкость нефти, содержание в ней смол и асфальтенов снижаются [10, 11]. Содержание VO-р и Ni-р, обнаруженных нами в очень низких концентрациях, также уменьшается с глубиной (табл. 2). Эта тенденция изменения параметров состава нефти может быть связана с увеличением пластовой температуры с возрастанием глубины залежи и частичным разложением сложных высокомолекулярных молекул.

Таблица 2. *Содержание металлопорфиринов в нефти месторождения Белый Тигр*

Нефть	Миоцен	Олигоцен	Фундамент
Содержание Ni-р, нмоль/г	2	3	0
Содержание VO-р, нмоль/г	2	0	3
П/Ф	1,28	2,04	2,84
П/н-С17	0,24	0,46	0,51
Ф/н-С18	0,24	0,24	0,23
CPI-1(C20-C28)	1,0	1,1	1,1
CPI-2(C22-C30)	1,0	1,1	1,1
CPI-3(C24-C32)	1,1	1,1	1,1
CPI(C12-C34)	1,2	1,1	1,2
MPI	0,61	0,78	0,51
Rc	0,77	0,87	0,71

Распределение парафиновых углеводородов нефтей представлено на рис. 2. Среди н-алканов преобладают C_{10}–C_{20}. По характеру их молекулярно-массового распределения нефти сходны между собой и с рассеянными органическими веществами пород миоцена. В то же время, отношение П/Ф в нефтях колеблется в широких пределах (1,28...2,84). Это свидетельствует о различии в условиях накопления их исходного нефтематеринского вещества. Сопоставление нефтей и рассеянных органических веществ пород по величине отношения пристана к фитану, учитывая характер молекулярно-массового распределения н-алканов, показывает, что нефть миоцена могла быть генерирована одновозрастными отложениями (миоцен-1). Значения генетического параметра П/Ф для рассеянных органических веществ пород олигоцена (П/Ф=1,16...1,58) существенно ниже чем для нефти, залегающей в этих отложениях (П/Ф=2,04), что говорит об ином источнике нефти. Сложное геологическое строение территории, на которой располагается месторождение Белый Тигр, могло привести к заполнению ловушки в коллекторах олигоцена более молодой нефтью, генерированной толщей миоцена (миоцен-1 и миоцен-2), которая содержит разности пород с рассеянными органическими веществами, характеризующимся значениями П/Ф от 1,2 до 3,3.. Нефть, залегающая в породах фундамента наиболее близка к рассеянным органическим веществам пород миоцена-2.

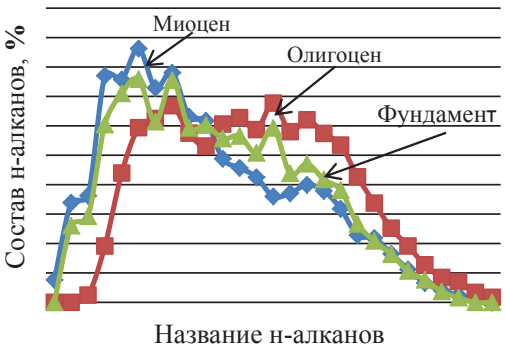


Рис. 3. *Молекулярно-массовое распределение н-алканов нефтей месторождения Белый Тигр*

Таким образом, газожидкостная хроматаграфия анализ проб нефти и образцов кернов месторождении Белый Тигр показывает, что нефтематеринское вещество для всех нефтей слагал преимущественно фитопланктон с примесью донных водорослей и незначительной долей наземных растений. Нефть миоцена генерирована органического вещества отложений, накапливавшихся в восстановительной среде, а нефти из коллекторов олигоцена и фундамента – в слабо окислительной и окислительной обстановках. Наиболее вероятным источником нефтей месторождения Белый Тигр являются полифациальные отложения миоцена, достигшие главной фазы нефтеобразования и способные генерировать нефть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красноярова Н.А., Серебренникова О.В., Зайцев С.П. Условия седиментации и катагенез рассеянного органического вещества нижней юры западной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 3. – С. 11–17.
2. Серебренникова О.В., Белоконь Т.В. Геохимия порфиринов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 86 с.
3. Савиных Ю.В., Лыонг З.Х., Утопленников В.К. ОВ пород кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа: Труды VIII Междунар. конф. – М., 2005. – С. 231–236.
4. Савиных Ю.В. Сравнительная характеристика молекулярного состава нефтей месторождений Дракон и Белый Тигр // Химия нефти и газа: Труды VII Междунар. конф. – Томск, 2009. – С. 157–160.
5. Ильинская В.В. Генетическая связь углеводородов органического вещества пород и нефтей. – М.: Недра, 1985. – 157 с.
6. Гончеров И.В. Геохимия нефтей западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 179 с.
7. Петров Ал.А., Арефьев О.А. Биомаркеры и геохимия процессов нефтеобразования // Геохимия. – 1990. – № 5. – С. 704–714.
8. Головко А.К., Пенева Г.С., Горбунова Л.В., Донг Ч.Л., Нгиа Н.Ч., Савилых Ю.В., Камьянов В.Ф. Углеводородный состав нефтей шельфовых месторождений Вьетнама // Нефтехимия. – 2003. – Т. 42. – № 1. – С. 13–22.
9. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 262 с.
10. Hoàng Đình Tiên, Hô Trung Chât, Nguyên Ngọc Dung, Nguyên Ngọc Ánh. So sánh đặc điêm địa hóa đá mẹ và dâu, khí ở hai bê trâm tích Cenozoi Cửu Long và Nam Côn Sơn // Tọp chí khoa học và kĩ thuật. – 2008. – T. 11. – № 11. – T. 15–23.
11. Bùi Thị Luận. Các tâng đá mẹ bê Cửu Long thuộc thêm lục địa Việt Nam // Tạp chí dâu khí. – 2004. – № 7. – T. 9–15.

Поступила 17.03.2011 г.

УДК 553.98

УЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННО-МЕТАСОМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ РАЗРАБОТКИ

Е.А. Гладков

Томский политехнический университет
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: gladkov1974@mail.ru

При разработке месторождений нефти и газа происходит изменение их первоначальных фильтрационно-емкостных свойств. Возможной причиной может являться деформационно-метасоматическое преобразование продуктивных отложений. Предлагается учитывать процессы приводящие к изменению объема пустотно-порового пространства как карбонатных, так и терригенных пород.

Ключевые слова:
Литология, деформационно-метасоматическое преобразование, разработка месторождений углеводородов.

Key words:
Lithology, deformation-metasomatic conversion, hydrocarbon layers development.

В настоящее время существует обширное количество исследований, посвященных проблеме образования месторождений углеводородов. Рассматривается три основных гипотезы – органическая, минеральная и минерально-органическая, однако автор склонен придерживаться полигенной природы образования углеводородов [1].

Многочисленными исследованиями [2–6 и др.] достоверно выделена связь тектоники с эманациями из верхней мантии в виде гидротермальных растворов (флюидов) и процессами изменения пород-коллекторов. При этом роль высокотемпературных гидротерм (флюидов), активизирующих процессы формирования вторичной пористости за счёт образования трещин гидроразрыва, весьма высока. В частности, изучение коллекторских свойств палеозойских отложений фундамента Западной Сибири (осадочные, метаморфические и изверженные породы) показало, что они характеризуются резкой неоднородностью и трещинно-кавернозным характером, возникшим за счёт метасоматической переработки пород гидротермальными (флюидами) растворами.

Современная гидротермальная деятельность, способствующая формированию метасоматитов, также установлена в пределах Припятской впадины и других районов древних платформ. На Тенгизском месторождении (Казахстан) повторными геохимическими съемками были выявлены геохимические аномалии, «свидетельствующие о пульсирующем потоке глубинных флюидов по разрывным нарушениям» [3].

Специальными исследованиями было установлено, что объемы накопленной добычи углеводородов и доказанные их запасы, могут быть сопоставимы с количеством привнесенного вещества [5]. Вышеуказанные авторы отмечают, что «понимание гидротермальной природы пластовых флюидов позволяет рассматривать накопление углеводородных масс, вторичные изменения пород разрезов, возникновение неотектонических структур, формирование аномальных поверхностных геохимических полей над залежами нефти и газа, как единый неразрывный во времени и пространстве процесс, связанный с дегазацией недр планеты» [5].

Детальные петрографические изучения шлифов фиксируют многочисленные зеркала скольжения, зоны дробления, вертикальную и латеральную трещиноватость, механическую деформацию пород (сжатие и растрескивание), катаклаз, изгиб слюд, вдавливание зерен, образование регенерационных каемок, возникновение минералов [7–9 и др.]. Тектоническая активность способствует привносу «агрессивных», насыщенных большим количеством карбонатного вещества флюидов из верхней мантии [7–8, 10–12 и др.].

Нефтеносные горизонты, по-существу, представляют собой сложную систему, часто блокового строения, вызванного наличием дизъюнктивных нарушений и зон глубинных разломов.

Несмотря на обилие многочисленных данных о влиянии тектоники и глубинных флюидов на залежи углеводородов, до сих пор практически нигде не учитываются процессы изменения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород-коллекторов в процессе их разработки. Автор предлагает выделять три основных фактора, влияющих на ФЕС пород-коллекторов: деформационные процессы, вторичное минералообразование и метасоматоз. Все вышеуказанные факторы, по существу, являются следствием влияния тектонических процессов, а именно тектонических дислокаций, которые возможны как следствие следующих процессов: горизонтальных либо вертикальных смещений, активизации зон глубинных разломов и переносе флюидов по ним, образования депрессионных воронок и прочее.

В последние годы ряд исследователей [13] получили фактические данные о влиянии деформационных процессов под действием эффективного давления, из-за уменьшения пластового давления, в условиях некомпенсированного отбора флюидов

из продуктивных отложений. Существующие методики позволяют определять относительные фазовые проницаемости пород-коллекторов, но в большинстве случаев они сходны и в своей основе имеют уравнение Пурселля (1949), в котором для расчёта проницаемости учитываются контактный угол, поверхностное натяжение, коэффициент пористости, капиллярное давление, коэффициент водонасыщенности и литологический множитель, учитывающий отличие капиллярной модели от структуры порового пространства реальных горных пород.

Данные, полученные на основе модели Пурселля, хорошо согласуются с экспериментальными результатами для смачивающей фазы, однако для несмачивающей фазы часто показывают неудовлетворительные результаты. Всё это легко объясняется необходимостью проведения специализированных сложных экспериментов с целью учета влияния на относительную фазовую проницаемость таких параметров, как извилистость поровых каналов, взаимосвязанность пор вмещающих пород, смачиваемость поверхности порового пространства и др. Доказано, что эти процессы приводят к изменению объёма и структуры порового пространства, что влечёт за собой, соответственно, и изменение проницаемости. Очевидно, что при изменении структуры порового пространства должны изменяться и относительные фазовые проницаемости, поскольку уменьшение порового пространства приводит к изменению радиуса поровых каналов. А, как хорошо известно, изменение радиуса поровых каналов приводит к изменению величины капиллярного давления. Однако указанные исследователи не учитывали движение пластовых флюидов, которые также могут изменять геометрию пустотно-порового пространства за счёт метасоматических процессов и вторичного минералообразования.

Таким образом, предлагается рассматривать деформационные и метасоматические процессы совместно [14], при этом вторичное минералообразование, как правило, является следствием обоих вышеуказанных факторов (рисунок).

Для этого вводится *новое понятие* деформационно-метасоматическое преобразование. Деформационно-метасоматическое преобразование – это преобразование пород в результате изменения структуры и объёма их пустотно-порового пространства при активном участии пластовых флюидов и вторичном минералообразовании, приводящее к изменению их фильтрационно-емкостных свойств.

Деформационно-метасоматическое преобразование залежей углеводородов, как частный случай, состоит из четырех последовательно сменяющих друг друга этапов: 1) в процессе формирования залежей углеводородов; 2) в результате наложенных процессов, вызванных различными факторами (тектоническими, климатическими и пр.); 3) в процессе разработки залежей углеводородов; 4) после окончания разработки залежей углеводородов.



Рисунок. *Основные факторы преобразования пород*

Более всего изучены процессы изменения минерального состава пород-коллекторов до начала разработки залежей углеводородов. Современное состояние изученности деформационно-метасоматических преобразований таково, что при разработке залежей углеводородов не учитываются деформационно-метасоматические преобразования пород-коллекторов. Возможно, что одной из причин, объясняющих расхождение модельных и фактических данных при адаптации трёхмерных компьютерных геолого-технологических моделей, является изменение ФЕС продуктивных отложений в процессе их разработки. Более высокопроницаемые коллектора изменяются существенно быстрее, чем низкопроницаемые.

Согласно закону Вант-Гоффа принято считать, что при повышении температуры на каждые 10 °С константа скорости элементарной химической реакции увеличивается в 2...4 раза. При увеличении давления, температуры и концентрации глубинных флюидов, логично предположить, что процессы метасоматоза и вторичного минералообразования на глубинах в несколько километров будут протекать более интенсивно. К сожалению, правило Вант-Гоффа имеет ограниченную область применимости. В частности, этому правилу не подчиняются многие реакции, например, реакции, происходящие при высоких температурах, очень быстрые и очень медленные реакции. Правило Вант-Гоффа было выведено эмпирическим путём и позволяет в первом приближении оценить влияние температуры на скорость химической реакции в небольшом температурном интервале (обычно от 0 до 100 °С), что вполне хорошо согласуется с условиями, существующими на большинстве разрабатываемых либо планируемых к вводу в эксплуатацию месторождений углеводородов. Поэтому степень изменения ФЕС более глубоко залегающих месторождений может протекать гораздо быстрее, чем малоглубинных.

В процессе разработки месторождений углеводородов жидкости и газы в пластовых условиях находятся под действием сил, способствующих перемещению флюидов к забоям эксплуатационных скважин или, наоборот, удерживающих их в пласте. К основным источникам энергии, проявляющим себя при движении подземных флюидов к забоям действующих скважин, относятся: 1) сжимаемость нефти и воды в породах-коллекторах; 2) гравитационная энергия нефти в верхних слоях пласта по сравнению с энергией на его погружении; 3) упругость сжатого и растворенного газа в нефти и воде внутри продуктивного слоя или в зонах сво-

бодного газа, лежащих поверх горизонта, насыщенного нефтью; 4) упругое сжатие воды в пластах, сообщающихся с нефтяным резервуаром [15]. При эксплуатации скважин вышеуказанные типы энергий расходуются на преодоление сопротивления породы течению жидкостей и газа, перемещающихся в области более низких значений энергии и давления.

Особенно интенсивно этот процесс начинается при закачке воды (особенно поверхностной) в пласт. Поэтому первоначальные характеристики пород-коллекторов, коэффициент охвата, коэффициент вытеснения, относительные фазовые проницаемости, изменяются. Изменение ФЕС продуктивных отложений будет для различных скважин различным, что также осложняет процесс создания трехмерных фильтрационных моделей.

К сожалению, современное программное обеспечение не способно, а вернее сказать не подготовлено для расчета изменений ФЕС в результате деформационно-метасоматических преобразований. Особенно это актуально для месторождений, находящихся в многолетней эксплуатации, в которых первоначальные ФЕС породы могли претерпеть существенное изменение и тем самым повлиять на динамику выработки подвижных извлекаемых запасов и величину проектного коэффициента извлечения нефти.

Таким образом, действующие в настоящий момент «Методические рекомендации по проектированию разработки нефтяных и газонефтяных месторождений» (Приказ МПР РФ от 21.03.2007 г. № 61), «Национальный стандарт Российской Федерации «Месторождения нефтяные и газонефтяные. Правила проектирования разработки» (ГОСТ Р 53710–2009) не учитывают изменения, происходящие в процессе разработки месторождений углеводородов.

На основании многочисленных исследований можно утверждать, что фильтрационно-емкостные свойства продуктивных отложений и вмещающих пород изменяются в процессе разработки месторождений углеводородов как в призабойной зоне, так и в межскважинном пространстве.

Основываясь на предложенной концепции, становится очевидным, в силу каких причин возникают проблемы при адаптации геолого-технологических моделей к истории разработки, когда первые годы фактические и модельные параметры (дебит, пластовое и забойное давление и др.) совпадают, а потом начинают расходиться. Возможно, концепция деформационно-метасоматического преобразования продуктивных отложений в процессе их разработки сможет объяснить подобную проблему. Несомненно, что методологический подход на современном этапе создания трёхмерных цифровых геолого-технологических моделей необходимо пересмотреть.

Первоначальные фильтрационно-емкостные свойства высокопроницаемых пород-коллекторов будут изменяться существенно выше, чем низкопроницаемых [16]. Несомненно и то, что изменение ФЕС продуктивных отложений будет для различных скважин разным, что также осложняет процесс создания трехмерных фильтрационных моделей.

При теоретическом рассмотрении наиболее сильно будут подвергаться процессам преобразования карбонатные породы, сложенные 100 % известняком (кальцитом), который в результате полной доломитизации может уменьшать свой объем на 12,3 %; при кальцитизации возможен обратный процесс.

В зависимости от минералогического состава матрицы и цемента, автором предлагаются две классификации – для карбонатных (дополнение к С.Г. Вишнякову [17]) и терригенных коллекторов (дополнение к В.Н. Шванову [18]), основанные на изменении емкости коллектора в результате деформационно-метасоматических преобразований (табл. 1 и 2).

Таблица 1. *Классификация известково-доломитовых пород с учетом деформационно-метасоматических процессов (по [17], с изменениями и дополнениями автора)*

Порода	Содержание $Ca_2(CO_3)_2$, мас. %		Уменьшение объема пород при доломитизации, %	Содержание $CaMg(CO_3)_2$, мас. %		Увеличение объема пород при кальцитизации, %
Известняк	95…100	100	0,000	0	0	12,300
Известняк доломитистый	75…95	95	0,615	5…25	5	11,685
		90	1,230		10	11,070
		85	1,845		15	10,455
		80	2,460		20	9,840
		75	3,075		25	9,225
Известняк доломитовый	50…75	70	3,690	25…50	30	8,610
		65	4,305		35	7,995
		60	4,920		40	7,380
		55	5,535		45	6,765
		50	6,150		50	6,150
Доломит известковый	25…50	45	6,765	50…75	55	5,535
		40	7,380		60	4,920
		35	7,995		65	4,305
		30	8,610		70	3,690
		25	9,225		75	3,075
Доломит известковистый	5…25	20	9,840	75…95	80	2,460
		15	10,455		85	1,845
		10	11,070		90	1,230
		5	11,685		95	0,615
Доломит	0-5	0	12,300	100	100	0,000

При доломитизации наблюдается увеличение объема пустотно-порового пространства, а при кальцитизации – уменьшение, поэтому, зная состав породы, можно представить предполагаемый механизм, см. табл. 1.

Для терригенных пород возьмем классификацию, предложенную В.Н. Шванов[18], т. к. широко используемая в последние годы классифика-

ция А.А. Ханина [19], которая делит породы-коллекторы на 6 классов по абсолютной проницаемости, не учитывает минералогию продуктивных отложений.

Зависимость изменения вещественно-минерального состава породообразующих компонентов в результате деформационно-метасоматических преобразований представлено в табл. 2.

Таблица 2. *Изменение объема пустотно-порового пространства при полной доломитизации (кальцитизации) продуктивных отложений с различным типом цемента*

Цемент	Содержание цемента в породе, %	Состав цемента, %		
		Карбонатно-глинистый (карбонатов <50 %)	Глинисто-карбонатный (карбонатов >50 %)	Карбонатный (полностью карбонатный)
Базальный	40...50	0,100...2,500	2,500...5,500	4,920...6,150
Открытый поровый	30...40	0,060...2,000	1,850...4,430	3,690...4,920
Закрытый поровый	25...30	0,050...1,500	1,540...3,320	3,075...3,690
Неполный поровый	10...25	0,020...1,250	0,620...2,770	1,230...3,075
Контурный	5...10	0,010...0,500	0,310...1,110	0,615...1,230
Прерывистый контурный	1...5	0,002...0,250	0,060...0,550	0,123...0,615

Зная минералогический состав продуктивных отложений, их текстуру и структуру, можно прогнозировать степень изменения объема их пустотно-порового пространства, увеличения или уменьшения общей пористости.

В настоящее время автором совместно с сотрудниками Института химии нефти (ИХН СО РАН, г. Томск) проводятся эксперименты, которые позволят определить более точно скорость деформационно-метасоматического преобразования продуктивных отложений. Уже сейчас можно говорить о том, что эти изменения происходят существенно быстрее, чем было принято считать ранее. Так, доказана возможность образования доломита в присутствии карбамида и хлорида магния при температуре 160 °С. Оказалось, что присутствие нефти не оказывает заметного влияния на образование доломита.

Особенно актуально деформационно-метасоматическое преобразование пород в зонах расположенных рядом с флюидопроводящими «глубинные флюиды» участками. В таких участках, изменение ФЕС пород возможно в течение очень короткого промежутка времени.

Выводы

Доказано, что деформационно-метасоматическое процессы и вторичное минералообразование продуктивных отложений в процессе разработки месторождений углеводородов, необходимо учитывать. Процесс изменения минералогического состава и объёма пустотно-порового пространства продуктивных отложений в процессе разработки залежей углеводородов характерен для всех месторождений, находящихся на различной стадии разработки. Чем выше проницаемость продуктивных отложений и длительность их срока эксплуатации, тем сильнее изменяются их фильтрационно-емкостные свойства. При разработке месторождений углеводородов необходимо учитывать динамику изменения первоначальных коллекторских свойств, а в действующие регламентные документы внести дополнение, в котором разрешить учитывать изменения фильтрационно-емкостных свойств продуктивных отложений в более поздние годы эксплуатации, так как их первоначальные свойства могут претерпевать существенные изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский А.Н. Полигенез нефти и газа // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 419. – № 3. – С. 373–377.
2. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Локализованные потоки глубинных углеводородных флюидов // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ / под ред. А.Н. Дмитриевского. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 319–322.
3. Багдасарова М.В. Взаимодействие карбонатных пород с гидротермальными системами при формировании коллекторов нефти и газа // Литология и нефтегазоносность карбонатных отложений: Матер. научно-практ. конф. – г. Сыктывкар, 10–19 июня 2001. – Сыктывкар, 2001. – С. 125–127.
4. Дюнин В.И., Корзун В.И. Гидрогеодинамика нефтегазоносных бассейнов. – М.: Научный мир, 2005. – 524 с.
5. Коробов А.Д., Коробова Л.А. Зона развития уникальных природных резервуаров – породы фундамента тафрогенных областей // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ / под ред. А.Н. Дмитриевского. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 258–262.
6. Коробов Ю.И., Малюшко Л.Д. Флюидодинамическая модель формирования залежей УВ – теоретическая основа поисков месторождений нефти и газа // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ / под ред. А.Н. Дмитриевского. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 360–362.
7. Гладков Е.А. Условия формирования отложений подугольной толщи васюганской свиты юго-западной части Средневасюганского мегавала // Геология нефти и газа. – 2008. – № 6. – С. 37–42.
8. Гладков Е.А., Гладкова Е.Е Влияние тектонических процессов на разработку нефтегазовых месторождений // I Междунар. конф. памяти акад. А. П. Карпинского: Матер. научно-практ. конф. – г. Санкт-Петербург, 24–26 февраля 2009. – СПб., 2011. – С. 26–30.
9. Недоливко Н.М., Ежова А.В., Перевертайло Т.Г., Полумогина Е.Д. Роль дизъюнктивной тектоники в формировании пустотно-порового пространства в коллекторах пласта $Ю_1^3$ Западно-Моисеевского участка Двуреченского нефтяного месторождения (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 47–53.
10. Карнюшина Е.Е., Леоненко Г.Н. Свойства коллекторов Западной Сибири в зоне катагенеза // Вестник МГУ. Сер. геол. – 1989. – № 5. – С. 35–41.

11. Предтеченская Е.А., Шиганова О.В., Фомичев А.С. Катагенетические и гидрохимические аномалии в нижнее-среднеюрских нефтегазоносных отложениях Западной Сибири как индикаторы флюидодинамических процессов в зонах дизъюнктивных нарушени // Литосфера. – 2009. – № 6. – С. 54–65.
12. Холодов В.Н., Петрова Р.Н., Дементьева О.Ф. Проблема формирования вторичной пористости в песчаных коллекторах элизионных бассейнов // Коллекторские свойства пород на больших глубинах / под ред. Б.К. Прошлякова, В.Н. Холодова. – М.: Наука, 1985. – С. 58–72.
13. Абасов М.Т., Алияров Р.Ю., Джалалов Г.И., Рамазанов Р.А. О методе оценки изменения относительной фазовой проницаемости пород-коллекторов в процессе разработки // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 4. – С. 54–57.
14. Гладков Е.А. Влияние метасоматоза на разработку месторождений углеводородов // I Российский Нефтяной конгресс: Матер. научно-практ. конф. – г. Москва, 14–16 марта 2011. – М., 2011. – С. 90–93.
15. Маскет М. Физические основы технологии добычи нефти. – М.: Наука, 2003. – 608 с.
16. Гладков Е.А. Причины изменения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов в процессе разработки месторождений углеводородов // Современные вызовы при разработке и обустройстве месторождений нефти и газа Сибири: Матер. научно-практ. конф. – г. Томск, 18–19 апреля 2011. – Томск, 2011. – С. 44–45.
17. Вишняков С.Г. Карбонатные породы и полевое исследование их пригодности для известкования почвы // Карбонатные породы Ленинградской области, Северного края и Карельской АССР. Вып. 2. – М.: Госгеонефтеиздат, 1933. – С. 3–22.
18. Шванов В.Н. Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). – Л.: Недра, 1987. – 269 с.
19. Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. – М.: Недра, 1969. – 356 с.

Поступила 09.06.2011 г.

УДК 550.8.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

А.А. Захарова, И.В. Крохалев*, В.Е. Пешков**, И.В. Пешков***, К.М. Паровинчак****, Е.А. Синицин*****

Томский политехнический университет
*ОАО «Таймыргаз», г. Норильск
**Томский филиал ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»
***ООО технологическая компания «Шлюмберже», г. Тюмень
****ОАО НК «Роснефть», г. Москва
*****ООО «Геологическая сервисная компания», г. Томск
E-mail: pochta@tf-sniiggims.ru

Дано теоретическое обоснование метода определения коэффициента вытеснения нефти из пласта при естественном режиме эксплуатации залежи. Полученные коэффициенты соответствуют экспериментальным значениям. Преимуществом метода является учет большей (до 10 га) площади пласта при расчетах фильтрации нефти в пластовых условиях, в отличие от керновой модели, характеризующей одну точку в пласте. Показано, что погрешность метода при 3-х разовом определении параметра на одной скважине не превышает 0,7 %.

Ключевые слова:
Вертикальная плотность запасов, гидродинамические исследования, депрессия, коэффициент вытеснения, нефть, подсчет запасов, скважина, установившийся режим.

Key words:
Displacement efficiency, drillhole, estimation of reserves, hydrodynamic research, oil, pressure drawdown, steady-state regime, vertical density of reserves.

Введение

Подсчёт запасов нефти – заключительная стадия разведки месторождения. После защиты отчёта по подсчёту запасов в Государственной комиссии по запасам, месторождение вступает в стадию разработки. Точность в определении количественной величины запасов и закономерность распределения их плотности по месторождению оказывает существенную роль на экономические показатели разработки месторождений углеводородного сырья. Сложившаяся практика подсчёта запасов основана на методике определения геометрического объёма пласта по результатам обоснования его размеров на основе трёхмерного моделирования. Основные параметры пласта вводятся в модель на основе анализа результатов промыслово-геофизических исследований. В ходе исследований определяются геометрические параметры по замерам величин толщины и пористости на стенке скважины, и учет их возможных изменений в межскважинном пространстве, по результатам моделирования генетических процессов формирования пласта.

При подсчёте запасов желательно избегать ошибок, возникающих за счёт естественного изме-

нения ёмкостных параметров пласта при удалении от стенок скважины. Для этого авторы предлагают метод определения плотности запасов по результатам гидродинамических исследований, проводимых по практически отработанным стандартным технологиям испытания скважин.

Метод определения подвижных запасов нефти по результатам падения давления в пласте в процессе отбора флюида основан на оценке упругого запаса пластового флюида [1]:

$$\Delta V_y = V_0 P_{пл} \beta_{ж} \ , \qquad (1)$$

где V_0 – объем порового пространства, занятый флюидом, м^3; ΔV_y – упругий запас нефти, образованный за счёт сжатия под действием пластового давления, м^3; $\beta_{ж}$ – упругоемкость жидкости (нефти, газа), определенная в лабораторных условиях по результатам анализа глубинной пробы, 1/МПа; $P_{пл}$ – пластовое давление в залежи, МПа.

На основе этой формулы можно определить объём порового пространства, занимаемого нефтью в пласте-коллекторе. Объем порового пространства определяется по результатам замера объема отобранного из пласта флюида и величины падения давления за период отбора этого объема:

$$V_0 = \frac{\Delta V_ф}{\Delta P_{пл} \beta_{ж}} \ , \qquad (2)$$

где $\Delta P_{пл}$ – величина падения давления за период отбора жидкости из пласта в объёме, равном $\Delta V_ф$, МПа.

Данный способ оценки извлекаемых запасов нефти широко известен [2], но его применение рекомендовалось при работе на ограниченных залежах углеводородного сырья с небольшими запасами. Авторы настоящей работы считают, что при определённой технологии гидродинамических исследований скважин предлагаемый метод можно применять и на месторождениях, где давление на контуре залежи не падает, т. к. в связи с большими размерами месторождения воронка депрессии за короткий период исследования скважины не распространяется до его контура.

Постановка задачи

Решение уравнения, описывающего восстановление давления на стенке скважины, основано на принципе суперпозиции. После закрытия скважины процесс восстановления давления рассматривается как его рост за счёт пуска в этой же точке нагнетательной скважины с тем же дебитом Q_0. Пластовое давление P_k (на контуре воронки депрессии) замеряется в остановленной скважине. Забойное давление P_c (на стенке скважины) замеряется в работающей скважине. Исходя из принципа суперпозиции, при изохронном методе гидродинамических исследований фонтанирующей скважины, когда время работы скважины на режиме равно времени её остановки, давление на контуре воронки депрессии $P_к(t)$ за это время будет меньше пластового $P_{пл.}$ на величину $\Delta P_{к.}$ Величина забойного давления в скважине P_c и на контуре воронке депрессии $P_к$ зависит от очередности режима исследования. Схема воронки депрессии при пуске и восстановлении давления при изохронном методе представлена на рис. 1.

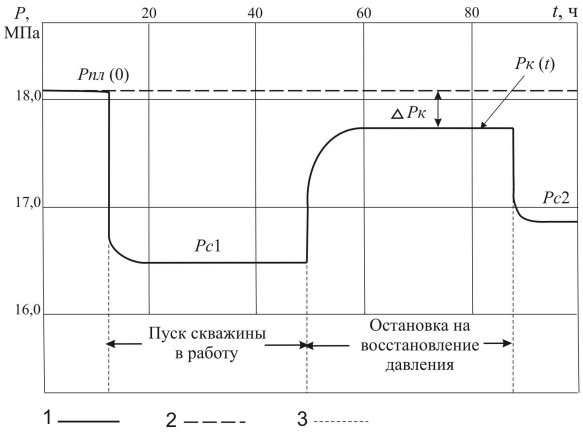


Рис. 1. *Схема изменения забойного давления при изохронном методе исследования фонтанирующей скважины: 1) изменение давления в процессе исследования; 2) уровень начального пластового давления; 3) момент смены режима работы*

Исходя из этих представлений, при повторении одного и того же режима на малодебитной скважине, или при исследовании фонтанирующей скважины на нескольких режимах при изохронном методе исследования, пластовое давление на контуре радиусом $R_к$ должно уменьшится на величину $\Delta P_{к.}$. Величина $\Delta P_к$ будет увеличиваться за счет увеличения общего времени работы скважины. При работе на очередном режиме исследования $\Delta P_к$ будет возрастать. Таким образом, падение давления на контуре питания определится как разница:

$$\Delta P_к = P_{пл} - P_к(n), \qquad (3)$$

где $P_к(n)$ – давление на контуре питания после его восстановления перед очередным изохронном режиме, МПа; $\Delta P_к$ – падение давления на контуре питания за время отбора флюида в объеме $\Delta V_ф$, МПа.

Зафиксировав величину $\Delta P_к$, объём активных запасов в пределах контура питания с давлением $P_к$ можно определить по формуле:

$$V_{0к} = \frac{\Delta V_ф}{\Delta P_к \beta_{ж}},$$

где $V_{0к}$ – начальный объем флюида в пределах контура питания, м^3; $\Delta V_ф$ – фактический объем отобранного флюида из пласта, м^3.

Таким образом определяется количество активных, подвижных запасов нефти, извлекаемых при режиме эксплуатации месторождения на истощение запасов нефти. В настоящей статье авторы рассматривают метод определения емкостных параметров пласта по результатам гидродинамических исследований скважин.

Метод основан на результатах определения вертикальной плотности запасов

$$П_{вз} = hmK_{нг},$$

где для подсчета использованы параметры пласта: толщина h, см; пористость m, в долях единицы; коэффициент нефтенасыщения $K_{нг}$, в долях единицы; параметр, характеризующий вертикальную плотность геологических запасов, $П_{вз}$, см.

Площадь месторождения, на которой имеют место запасы нефти с такой плотностью, определяется по величине радиуса контура питания $R_к$, см, [3]:

$$R_к = \sqrt{\frac{1}{\pi}\chi t}, \qquad (4)$$

где χ – пьезопроводность пласта, см^2/с; t – время работы на режиме, с.

Параметры пласта и скважины по результатам исследования на установившихся режимах описываются уравнением:

$$\varepsilon = \frac{Kh}{\mu} = 1,84 b\eta \ln\frac{R_к}{r_п}, \qquad (5)$$

где ε – гидропроводность пласта, мкм^2·см/(мПа·с); K – проницаемость, мкм^2; μ – вязкость нефти, мПа·с; b – коэффициент усадки пластовой нефти при переходе в поверхностные условия и выделении из нее растворенного газа; η – коэффициент продуктивности, м^3/(сут·МПа); $r_п$ – приведенный радиус скважины по долоту, см;

Фильтрация при неустоявшемся режиме описывается уравнением

$$\Delta P_к(t) = \frac{Q_0}{4\pi\varepsilon}\frac{\ln 2,25\chi t}{r_п^2}, \qquad (6)$$

где Q_0 – м^3/сут. В этом широко известном уравнении фигурируют те же параметры пласта, что и в ур. (5). Начальную (ориентировочную) величину пьезопроводности определяют по формуле для гидрофильного пласта [3]:

$$\chi = \frac{K}{\mu m K_{нг}\beta_{ж}}, \qquad (7)$$

Для первого цикла итерации значения параметров в формуле (7) заложены исходя из общегеологической информации: проницаемость и пористость K и m – ориентировочно по аналогии с изученным разрезом. Вязкость нефти принимается по результатам анализа глубинных проб, или по расчёту её значения по поверхностной пробе.

Коэффициент нефтенасыщения $K_{нг}$ принимается в первом приближении по аналогии с ближайшими месторождениями. Первое значение $R_к$ определяют по формуле (4) и, используя это значение, по формуле (5) находят величину гидропроводности ε. Из формулы (6) выделяют величину пьезопроводности – χ, и вычисляют её значение. По первому значению $R_к$, определенному по формуле (4), рассчитывают из формулы (5) величину радиуса скважины по долоту r_c=$r_п$ и определяют значение r_c последующими циклами итерации. Принцип расчета параметров методом итерации заложен в программном комплексе «Балансгидродинамик» [4]. Методом итерации пьезопроводность пласта определяется по результатам исследования скважины, по её значениям определяют значение $R_к$ по формуле (4), а площадь дренирования пласта скважиной – как площадь – S_R круга с радиусом $R_к$

$$S_R = \pi R_к^2.$$

Если запасы V_0, определённые по формуле (2), разделить на площадь пласта в исследуемой скважине S_R, то получим величину удельной плотности вытесняемых при естественном упруговодонапорном режиме подвижных запасов – $П_{зп}$=V_0/S_R. Обработка результатов гидродинамических исследований на установившихся режимах методом итерации по программе «Балансгидродинамик» позволяет определить гидропроводность пласта по формуле (5). Пьезопроводность определяется по формуле (7), разработанной для гидрофильных коллекторов Западной Сибири.

Определив значение пьезопроводности, определяем величину контура питания $R_к$ по формуле (4). При делении гидропроводности на пьезопроводность определяется комплексный параметр вертикальной плотности геологических запасов

$$П_{вз} = hmK_{нг} = \frac{\varepsilon}{\chi\beta_{ж}}.$$

Этот метод основан на теории гидродинамических исследований [1] и подробно описан в работе [3]. По мнению авторов, величина плотности запасов, определенная по результатам гидродинамических исследований, характеризует свойства коллектора в пластовых условиях более адекватно по сравнению с объемным методом. Так, свойства коллектора определяются для всей площади дренирования пласта вокруг скважины, а не только у её стенки (где свойства пласта определяют по промысловым геофизическим исследованиям), которая подвержена разрушению, деформации и проникновению части промывочной жидкости в призабойную зону. Рассмотрим результаты предлагаемого подхода к решению задач по подсчету запасов на примере гидродинамических исследований скважины № 2 Сосновской площади.

Скважина № 2 испытывалась в интервале перфорации 1923...1926 м. После освоения скважины в ней было замерено пластовое давление, величина которого составляла 18,1 МПа. Исследования фонтанирующего притока нефти производилось изохронным методом, по циклам: 24 ч фонтанирование через штуцер и 24 ч – остановка на исследования методом кривой восстановления давления. Результаты исследования приведены в табл. 1 и на индикаторной диаграмме (рис. 2) в координатах Q – $f(P_c)$. Прямая индикаторная линия P_c – $f(Q)$ пересе-

кает ось ординат в точке, где дебит равен нулю (Q=0), тогда P_c=$P_{пл}$. Первоначально индикаторная диаграмма была построена так, как показано пунктиром на рис. 2, и интерпретировалась как работа скважины при P_c<P_s, где P_s – давление насыщения нефти газом (считалось, что забойное давление снижается меньше, чем величина давления насыщения). Через 2 мес. на скважине приступили к отбору глубинных проб и замерили пластовое давление, величина которого оказалась ниже 14 МПа. По результатам исследования глубинной пробы были определены свойства нефти в пластовых условиях: коэффициент усадки b=1,29; коэффициент сжимаемости $\beta_н$=24·10^{-5}, 1/МПа; вязкость нефти в пластовых условиях μ=0,5, мПа·с; давление насыщения P_s=12,5, МПа.

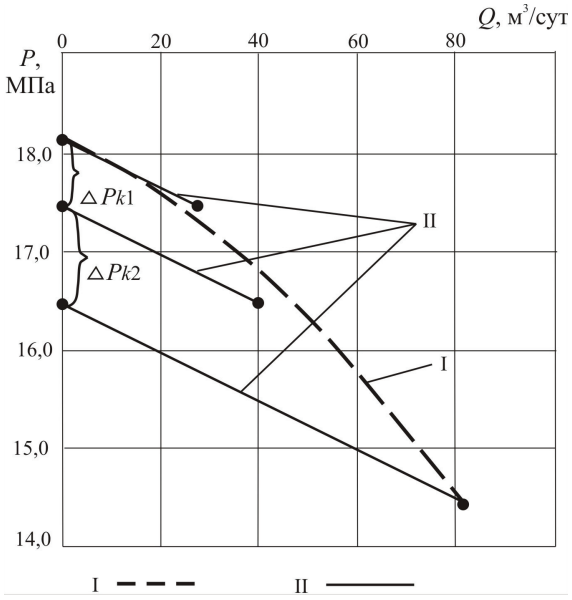


Рис. 2. *Индикаторная диаграмма, построенная по результатам исследований скважины № 2 Сосновской площади в интервале перфорации пласта А$_4$ 1923...1926 м: I) первый вариант индикаторной диаграммы; II) индикаторные диаграммы по каждому установленному режиму при изохронном исследовании*

Результаты анализа глубинной пробы позволили авторам провести повторную интерпретацию результатов гидродинамических исследований. Индикаторная диаграмма на установившихся режимах показана на рис. 2. Она построена по принципу постоянства коэффициента продуктивности, при падении давления на контуре питания.

В табл. 1 приведены исходные данные для обработки гидродинамических исследований с учетом падения давления по формуле (3).

Результаты расчета гидродинамических и емкостных параметров пласта приведены в табл. 2. Сопоставление запасов производилось в пределах контуров $R_к$, определенных по гидродинамическим исследованиям.

В табл. 2: ΔV_0 – подвижные (вытесняемые) запасы, определенные по формуле (1) на площади влияния скважины S_R; геологические запасы – $Q_г$, определены по гидродинамической плотности запасов на той же площади с их перерасчетом в такие же поверхностные условия. Частное от деления величины подвижных запасов ΔV_0, определенных по формуле (1), на величину геологических запасов, определенных по величине вертикальной плотности запасов $П_{вз}$, и умноженное на величину этой площади, оцененную по исследованиям методом установившихся режимов, авторы считают коэффициентом вытеснения в пластовых условиях, при упруго-водонапорном режиме фильтрации. Как видно из полученных результатов, табл. 2, величина $K_в$ определяется на каждом режиме исследования, погрешность определённая на каждом режиме менее 1 %, что позволяет рекомендовать предложенный метод даже при исследованиях на минимальном количестве режимов. Величины этого параметра даже на одном режиме адекватны свойствам пласта в условиях его залегания и характеризуют значительную площадь порядка 10 га. Традиционный метод определения коэффициента вытеснения основан на лабораторных испытаниях на специально подобранном наборе кернов.

Этот пример позволяет рекомендовать способ определения $K_в$ даже при исследовании скважины на 2-х режимах фильтрации. Таким образом, широко известная технология изохронных исследований, описанная в [5], при проведении работ по испытанию скважины на приток при её обработке по предлагаемой программе и программам разработанным в ТФ ФГУП «СНИИГГиМС», г. Томск, позволяет решить народохозяйственную проблему стоящую

Таблица 1. *Результаты исследования скважины № 2 Сосновской площади в интервале перфорации 1923...1926 м*

Диаметр штуцера, мм	Время работы, ч	P_{c}, МПа	$P_k(t)$, МПа	$\Delta P=P_k(t)-P_{c}$, МПа	Q, м³/сут	η, м³/(сут·МПа)
3	24	17,4	18,1 ($P_{пл.}$)	0,7	27,6	39,4
4	24	16,4	17,4	1,0	40,0	39,6
6	24	14,4	16,4	2,0	80,1	39,1

Таблица 2. *Расчет коэффициента вытеснения в пластовых условиях*

Диаметр штуцера, мм	ε, мкм²·см/мПа·с	χ, см²/с	$П_{эл}$, м	$R_к$, м	S_R, м²	V_0, м³	$Q_г$, м³	$K_в=V_0/Q_г$	$\Delta\sigma$, %
3	62,34	11103	0,234	175,0	96162	16428	17443	0,945	−0,3
4	62,62	11156	0,234	175,2	96382	16502	17483	0,944	−0,4
6	61,78	10997	0,234	174,0	95067	16471	17245	0,955	+0,7
Среднее	62,25	11085	–	–	–	–	–	0,948	–

перед нефтяниками, как при оценке извлекаемых запасов, так и при моделировании процесса добычи нефти, т. к. позволяет определить более достоверно коэффициент извлечения нефти, который определяется как произведение коэффициента вытеснения на коэффициент охвата пласта: $K_в K_{от} K_{оп}$.

Коэффициент $K_в$ предлагается определять в условиях большой площади охвата пласта, при естественном давлении его залегания, а $K_{от}$ – коэффициент охвата по толщине и $K_{оп}$ – коэффициент охвата по площади, зависят от плотности сетки скважин и способов первичного и вторичного вскрытия пласта. Расчеты по скважине № 2, приведенные в качестве примера, были проведены для каждого режима, чтобы показать их достаточную точность, даже если скважина была исследована на двух режимах, между которыми зафиксировано падение пластового давления.

Выводы

1. Предложен метод определения коэффициента вытеснения нефти из пласта при естественном режиме эксплуатации залежи, дано его теоретическое обоснование.
2. Показано, что максимальное отклонение коэффициента вытеснения, определенного по результатам гидродинамических исследований, составляет 0,007, т. е. погрешность метода при 3-х разовом определении параметра на одной скважине не превышает 0,7 %, что приемлемо при разработке месторождения и определения коэффициента извлечения нефти при подсчете запасов.
3. Изохронный метод гидродинамических исследований скважин рекомендуется применять при геолого-разведочных работах на нефтяных и газовых месторождениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чарный И.А. Подземная гидродинамика. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 312 с.
2. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследования нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра, 1984. – 272 с.
3. Ивлев Д.А, Князькова Л.Ю, Крылов О.В, Пешков В.Е. и др. Гидродинамические исследования малодебитных скважин при их пуске в работу при монотонном изменении режима работы // Геолого-промысловые исследования скважин и пластов: Матер. научно-практ. конф. – Тюмень, 2002. – С. 88–104.
4. Программный комплекс: «Балансгидродинамик». Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009612364, заявл. 24.03.09; зарег. в реестре 12.05.09; патентодержатель ООО «Сибнефтегазинновация».
5. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин / под ред. Г.А. Зотова, З.С. Алиева. – М.: Недра, 1980. – 301 с.

Поступила 18.07.2011 г.

УДК 504.064.2.001.18:550.8.015

ОЦЕНКА ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Ал.А. Лукин

Томский политехнический университет
E-mail: Lukin@tpu.ru

Исследовано воздействие работы эксплуатационных скважин полигона захоронения промышленных отходов Сибирского химического комбината на колебание напоров в наблюдательных скважинах и выделение частотных составляющих техногенного и природного колебаний в спектре. Показана возможность использования функции взаимной корреляции и Фурье-анализа для оценки гидрогеодинамического влияния режима работы эксплуатационных скважин.

Ключевые слова:
Гидрогеодинамическое влияние, скважины, колебание напоров, техногенные и природные колебания, Фурье-анализ, функция взаимной корреляции, полигон захоронения.

Key words:
Hydrodynamic impact, well, pressures oscillation, manmade and natural oscillation, Fourier-analysis, cross-correlation function, landfill.

Основным методом оценки гидрогеодинамического влияния скважин является численное гидродинамическое моделирование на персональных компьютерах с использованием специализированных программных комплексов [1]. В программах реализован алгоритм решения дифференциального уравнения нестационарной плановой фильтрации методом конечных разностей. Существующие программы позволяют решать ряд задач, относящихся к теме статьи: численное определение гидростатического напора в любой точке пространства, возможность учета геологического строения и других начальных и граничных условий, в том числе неравномерный режим работ скважин

за весь период работы той или иной геотехнической системы. Отметим сложности и нерешенные задачи: трудоемкость в создании гидрогеодинамических моделей, учитывающих всю сложность геологического разреза и других условий; не изученность влияния неравномерно прерывистой работы скважин на колебательный режим напоров, соответственно не разработаны критерии амплитудного воздействия (хотя намечены некоторые подходы [2]) и методика вычленения техногенных состовляющих в общей системе всех природных факторов, влияющих на гидрогеодинамический режим подземных вод.

В статье предложен новый подход, основанный на использовании статестической функции взаимной корреляции и Фурье-анализа в амплитудно-частотном варианте для разделения и выделения частотных составляющих технологической работы эксплуатационных скважин и природных колебаний. В настоящее время в гидрогеологии методы изучения режима подземных вод используются только для анализа и прогноза природных колебаний уровней, цикличностей, ритмов различной продолжительности [3].

Объектом изучения является полигон захоронения промышленных отходов Сибирского химического комбината (СХК), расположенный на правом берегу р. Томь, в 30...40 км южнее от места ее впадения в р. Обь. Выбор объекта связан как чисто с практической точки – полигон имеет значительное количество контрольных и наблюдательных скважин, так и с актуальностью региональной экологической проблемы – оценка условий взаимодействия полигона захоронения жидких промышленных отходов СХК и Томского водозабора подземных вод.

1. Выявление технологического воздействия

Основной задачей при использовании взаимно корреляционной функции (ВКФ) является выявление влияния и количественная оценка технологического режима работы полигонов СХК на колебательный режим напоров в наблюдательных скважинах.

ВКФ представляет собой оценку корреляционных свойств двух функций [4]. В нашем случае, функции технологической работы типовой нагнетательной скважины полигона и функции изменения гидростатических напоров в наблюдательной скважине.

Вычисление ВКФ производится по формуле:

$$B(m) = \frac{1}{n-|m|} \sum_{i=1}^{n-|m|} (f_{1i} - \overline{f_1})(f_{2i} - \overline{f_2}), \qquad (*)$$

где m=0; ±Δ; ±2Δ; ...; ±MΔ; n – число точек для каждой реализации; f_{1i} и f_{2i} – i-е значение первой и второй функций; $\overline{f_1}$, $\overline{f_2}$ – их среднее значение.

Методика расчета:

Исходными данными для расчетов являются полевые данные замеров гидростатических уровней в наблюдательных (Сн-84, Сн-93, Сн-98, Сн-101, Сн-106) и контрольных (Г9) скважинах, вскрывающих II технологический горизонт. Интервал времени ограничен 4 годами, с 01 января 2005 по 31 декабря 2008 гг., дискретность записи – один раз в месяц.

В качестве эталонного сигнала технологической работы полигона использовалась модельная кривая изменения напоров в нагнетательной скважине Н-18, режим которой является типичным для работы всего полигона. Дискретность значений и интервал времени приведен в соответствии с предыдущими данными.

Далее расчет проводился по формуле (*), результаты расчета представлены в виде графика $B(m)$, рис. 1.

Анализ результатов

В результате выполненных расчетов и построений уверенно выявились скважины, находящиеся под воздействием технологического режима рабо-

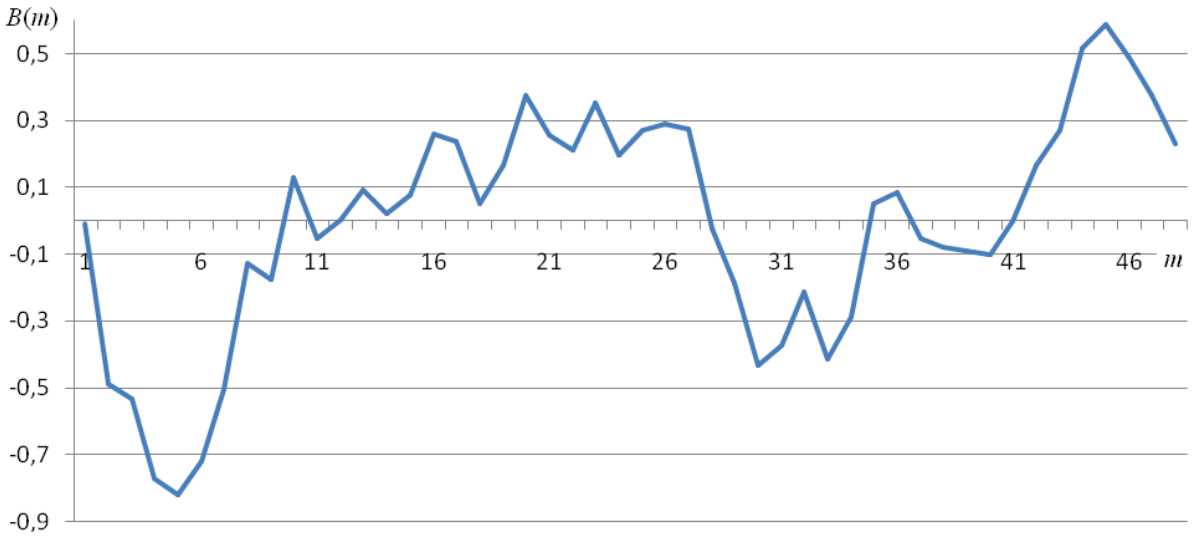


Рис. 1. *График ВКФ изменения гидростатических уровней в скважине Г-9 и технологического режима работы полигона*

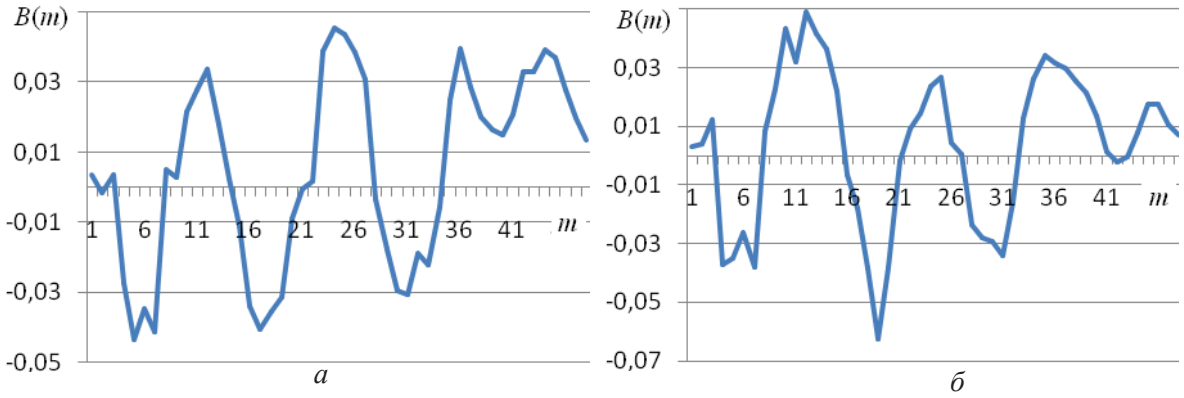


Рис. 2. *График ВКФ изменения гидростатических уровней в скважине Сн-84 (а) и Сн-106 (б) и технологического режима работы полигона*

ты полигона (Г9, А4 и др. контрольные скважины), и без существенного влияния (Сн-84, Сн-93, Сн-98, Сн-101, Сн-106 – наблюдательные скважины единой системы контроля недр).

На рис. 1 приведен график ВКФ, показывающий степень корреляции изменения гидростатических уровней в контрольной скважине Г-9 и технологического режима работы полигона.

Как видно из рисунка, коэффициент корреляции достигает 80 %. Это свидетельствует о доминирующем влиянии технологического режима работы полигона на скважину Г-9 на фоне природных источников влияния. Из графика видно, что максимальное значение корреляции наблюдается при m=5, что соответствуют моменту установления квазистационарного режима воздействия нагнетательных скважин на скважину Г-9.

Далее рассмотрим, какой вид имеет ВКФ для наблюдательных скважин единой системы контроля недр, расположенных на значительном удалении от полигона. В качестве примера на рис. 2 приведены графики ВКФ для скважин Сн-84 (4 км от полигона) и Сн-106 (9,3 км от полигона).

Из рис. 2 видно, что в обоих случаях значения ВКФ не превышают 4...6 %. Это свидетельствует об отсутствии влияния режима работы полигона на эти скважины.

2. Выделение частотных составляющих технологического и природного колебаний

Как известно [5], любой сигнал можно представить совокупностью гармонических составляющих (гармоник) – в виде ряда Фурье. Для точного представления сигнала требуется бесконечное число гармоник. Совокупность этих весов называется спектром.

Разложение наблюденного сигнала или поля на различные частотные составляющие, что и представляет сущность спектрального анализа, уже само по себе дает много информации о структуре сигнала или поля [4]. Важно подчеркнуть применимость спектрального анализа для описания свойств геофизических сигналов и полей, заданных как детерминированными, так и случайными функциями.

В настоящее время спектральный анализ объединяет методы анализа Фурье и статистического анализа временных, в том числе любых дискретных, последовательностей наблюденных значений. Отметим, что при обработке данных конечной длительности, к которым относятся все геофизические наблюдения, спектральный анализ оказывается более предпочтительным.

Решалось две задачи:

1. Нахождение спектров колебания напоров в наблюдательных, контрольных и нагнетательных скважинах.
2. Анализ и выделение в спектрах натурных наблюдений технологического режима работы полигона и природной составляющей.

Методика расчетов

Исходным сигналом были материалы замеров гидростатических уровней в наблюдательных и контрольных скважинах, вскрывающих II технологический горизонт. В нашем случае наблюдения дискретны, и частота их составляет один замер в месяц. Для расчета спектра чистого технологического режима работы полигона исходным материалом являлась модельная кривая скважины Н-18. Так как модельные значения напоров были более частыми и неравномерными по времени, то они проводились в один вид с временными значениями наблюдательных скважин.

Каждый спектр состоит из двух частей: действительной – A и мнимой – B. Рассчитать эти части спектра сигнала можно по формулам [4]:

$$A = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} F_i \cos\left(\frac{2\pi ni}{N}\right), \quad B = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} F_i \sin\left(\frac{2\pi ni}{N}\right).$$

В этих выражениях F_i – значение функции в i-й точке; n – номер гармоники, изменяющийся от 1 до $N/2$, N – общее количество значений функции.

После получения значений действительной и мнимой частей можно рассчитать непосредственно амплитудно-частотные спектры сигнала:

$$S = \sqrt{A^2 + B^2}.$$

Анализ результатов и выводы

Анализ проводился путем сопоставления спектров изменения напора в скважинах с выделением совпадающих гармоник. Весь первичный материал брался в одном временном интервале с 01.01.2005 по 01.01.2009 (4 года) и с равномерной дискретностью. Поскольку при наложении спектров локальные максимумы совпадают, можно сделать вывод, что обуславливающие их гармоники имеют единый источник возбуждения. Чтобы исключить случайные совпадения гармоник спектров, особенно на высоких частотах, проводился комплексный анализ спектров в равноудаленных скважинах данного типа.

Для выделения технологической составляющей сопоставлялись амплитудно-частотные спектры всех контрольных скважин (А-4, Г-9 и др.) и эталонный спектр технологического режима работы полигона, рис. 3.

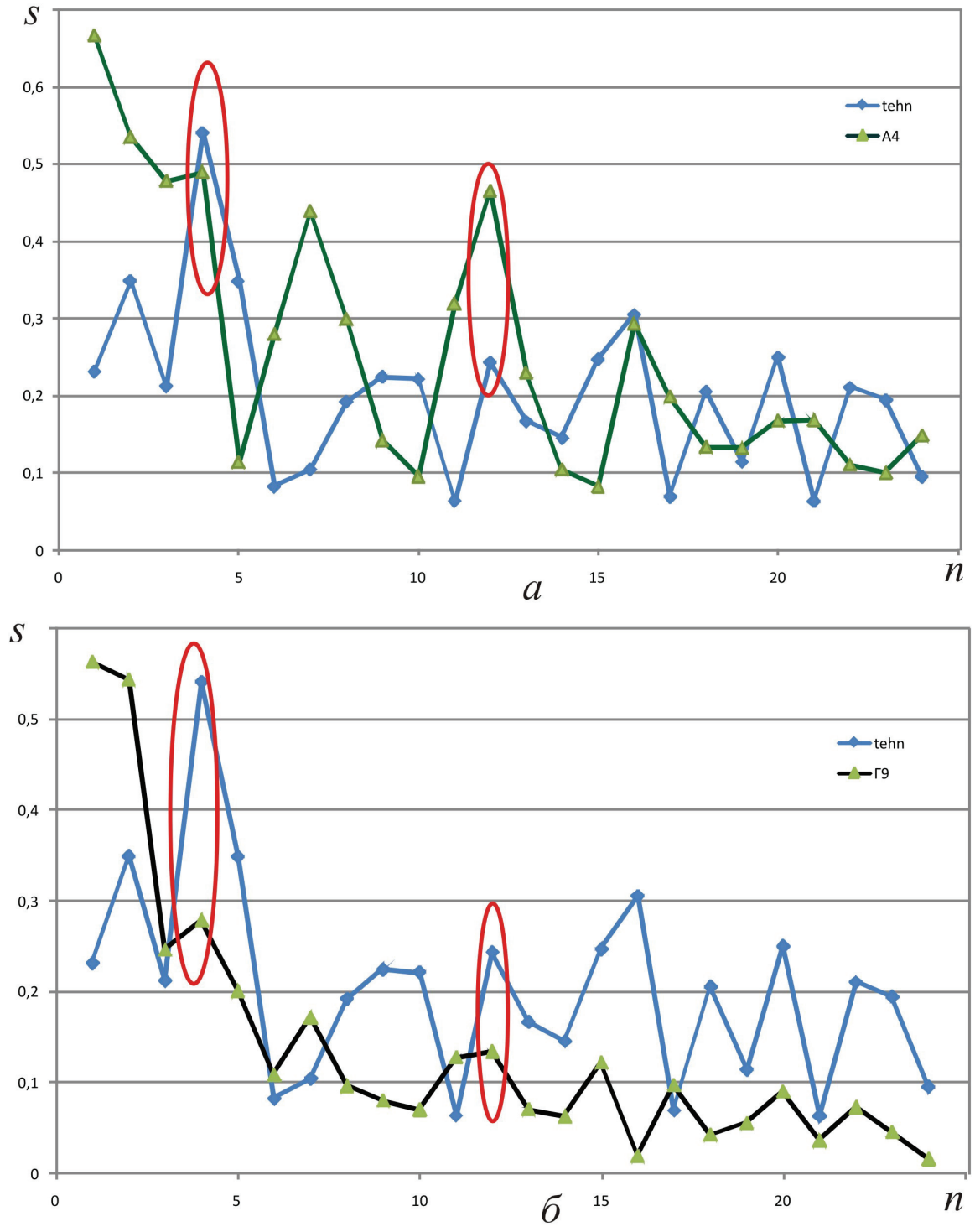


Рис. 3. *Амплитудно-частотные спектры эталонного технологического режима и скв. А4 (а) и Г9 (б)*

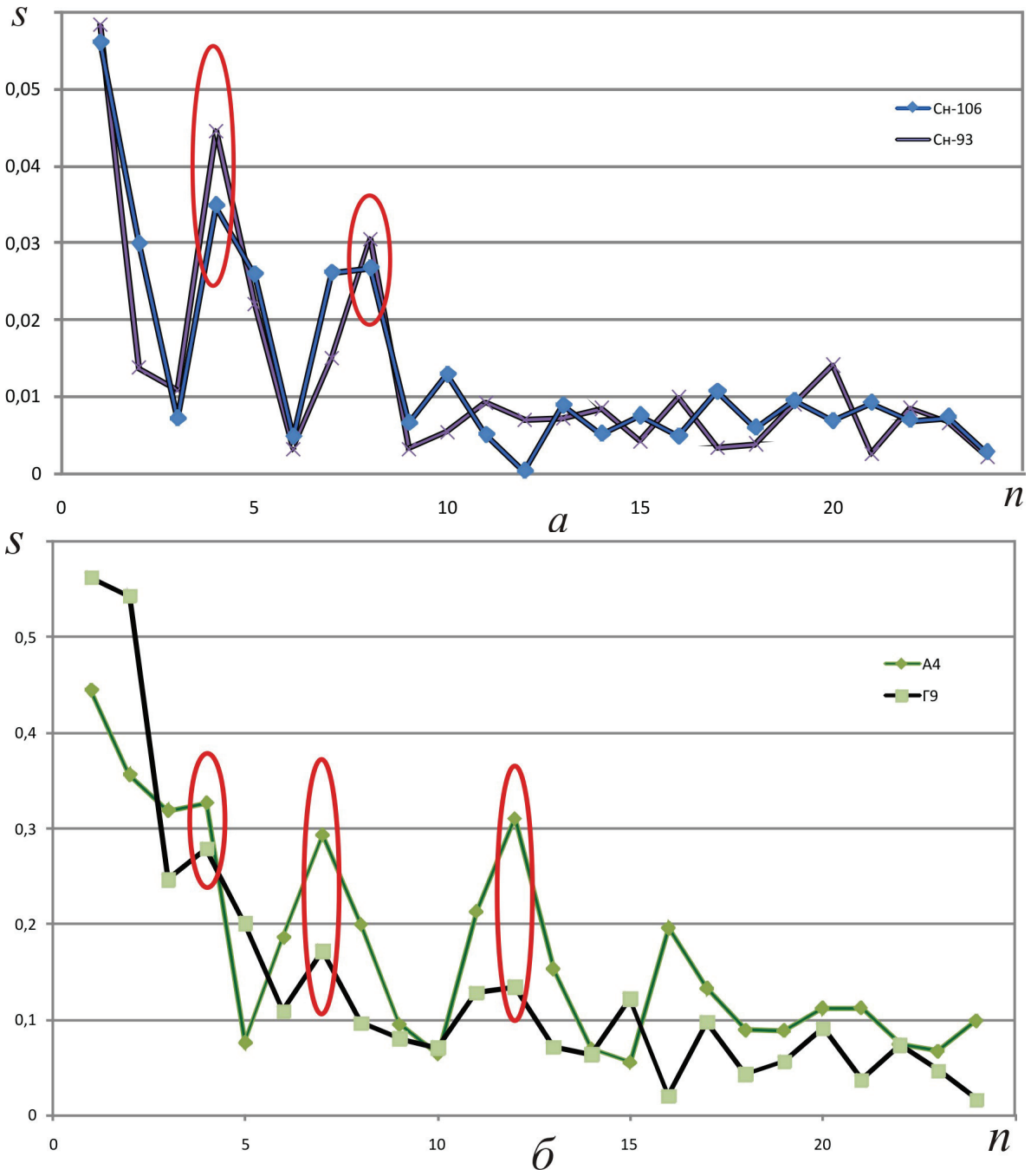


Рис. 4. *Амплитудно-частотные спектры колебания напоров в наблюдательных скважинах Сн-106 и Сн-93 (а) и в контрольных скважинах А4 и Г9 (б)*

Как видно из рис. 3, выделяются две основных гармоники, 4 и 12. Именно эти гармоники соответствуют технологическому режиму работы полигона. Интерпретация спектра в интервале $n>15$ проводилась с большой осторожностью, т. к. Фурье-анализ имеет ограничения на высоких частотах, на которых в спектрах может проявиться нестационарный режим фильтрации.

При выделении частот природного спектра в первую очередь использовались спектры колебаний в наблюдательных скважин, Сн-106 и Сн-93, расположенных соответственно на расстоянии 8 и 9 км от полигона. Ранее [2] было обосновано, что на колебательный режим этих скважин не оказывает влияние режим эксплуатационных скважин полигона. Поэтому спектры колебания напоров в этих скважинах принимаются за спектры природных колебаний. На рис. 4, *а*, показаны совмещенные спектры колебания напоров в наблюдательных скважинах Сн-106 и Сн-93.

Из рисунка видно, что спектры для этих скважин имеют очень хорошую сходимость на низких частотах. Выделяются два максимума в районе 4-й и 7-й гармоник, они соответствуют периодам в 12 и 6 мес.

Такие периоды объясняются сезонными колебаниями в гидрогеодинамическом режимах подземных вод.

Как видно, природные и техногенные спектры имеют общую гармонику – 4, поэтому наличие этой гармоники не является достаточным условием для разделения природных или техногенных воздействий. В спектре техногенных колебаний наличие 4-й гармоники объясняется сезонными факторами, влияющими на объем производства продукции комбинатом.

Далее рассмотрим спектры на рис. 4, *б*, в контрольных скважинах А4 и Г9, которые находятся под влиянием работы полигона и испытывают также природные колебания.

Как и следовало ожидать, на спектрах выделяются все три гармоники: 7-я – соответствует природным колебаниям, 12-я – гармоника технологического колебания и 4-я – общая гармоника. Причем 4-я гармоника, в связи с наложением, выделяется не так ярко.

Выводы

Исследовано воздействие работы эксплуатационных скважин на колебание напоров в наблюдательных скважинах. В амплитудно-частотном спектре колебаний напора выделены частотные составляющие техногенного и природного происхождения.

Расчеты с использованием функции взаимной корреляции на количественном уровне показали наличие техногенной составляющей в натурных колебаниях напоров только в контрольных скважинах, расположенных вблизи полигона. Гидродинамического влияния техногенной составляющей работы эксплуатационных скважин полигона захоронения промышленных отходов в наблюдательных скважинах не выявлено.

Фурье-анализ статистически подтвердил отсутствие влияния режима работы нагнетательных скважин полигона Сибирского химического комбината на радиусах свыше 2000 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 346–365.
2. Лукин А.А., Букаты М.Б., Зубков А.А., Гусев Е.В., Лукин Ал.Ан. Выявление и использование волновых характеристик в напорном поле при обосновании границ гидродинамического влияния геотехнических систем // Известия вузов. Геология и разведка. – 2008. – № 1. – С. 35–41.
3. Коноплянцев А.А., Семенов С.М. Прогноз и картирование режима грунтовых вод. – М.: Недра, 1974. – 216 с.
4. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
5. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / под ред. проф. В.П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2009. – 248 с.

Поступила 17.05.2011 г.

Гидрогеология

УДК 550.42:57.4 (571.1)

РАСЧЁТ ЗАТОРНЫХ УРОВНЕЙ РЕЧНЫХ ВОД НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

О.Г. Савичев

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Предложен метод расчёта подпора воды при ледовых заторах как функции расхода воды и толщины льда. Проведёна его апробация на примере рек южной части Западной Сибири (Томь, Чулым, Кия, Уса, Мрас-Су, Кондома). Показано, что условиями возникновения на изученных реках ледового затора с подпором воды более 1,5 м являются: а) относительно резкое повышение водного стока; б) превышение срочного расхода воды над нормой стока примерно в 3,5 раза и более; в) наличие ледяного покрова с толщиной льда 0,3 м и более на значительной части реки. По результатам моделирования подпорных явлений даны рекомендации по снижению опасности наводнений на р. Томь.

Ключевые слова:
Ледовые заторы, заторные уровни воды, наводнения, юг Западной Сибири.

Key words:
Ice jams, jam water levels, flooding, South of Western Siberia.

Введение

Для рек южной части Западной Сибири (рр. Томь, Чулым, Кия, Мрас-Су, Кондома и др.) характерна достаточно высокая вероятность наводнений, существенно ограничивающих хозяйственное использование речных долин. Причиной этих наводнений во многих случаях являются ледовые заторы (скопления в русле льдин), возникновение которых, в свою очередь, обусловлено следующими обстоятельствами: 1) основная часть водного стока формируется в горных районах (Кузнецкий Алатау, Горная Шория), а участки нижнего течения характеризуются равнинным рельефом и, как следствие, общим снижением скоростей течения; 2) многие реки имеют меридиональную направленность, что в условиях широтного изменения температуры воздуха (увеличение с севера на юг) обусловливает более ранние сроки вскрытия ледового покрова на юге; 3) в районах Горной Шории и Кузнецкого Алатау в период формирования и разрушения ледового покрова эпизодически выпадает аномально большое количество дождей, существенно превышающее норму месячных атмосферных осадков и приводящее к значительному отклонению характеристик ледового режима рек от соответствующих среднемноголетних значений; 4) на участках нижнего течения крупных рек имеются естественные и антропогенные сужения речных русел, в районе которых и происходит накопление ледового материала [1–3].

Очевидно, что в подобных условиях возникает острая потребность в гидрологических прогнозах, на основе которых можно было бы разработать мероприятия по предотвращению ледовых заторов и снижению ущерба от наводнений. В частности, необходимы методы, позволяющие предсказать сроки формирования ледовых заторов и величину подпора воды (дополнительного повышения уровней воды при заторе). К сожалению, в настоящее время надёжность подобного прогноза недостаточно высока, что и определяет актуальность рассматриваемой работы, целью которой являлась разработка и апробация метода расчёта заторных уровней речных вод в южной части Западной Сибири.

Исходные данные

Исходными данными для гидрологических расчётов послужили: 1) сведения Западно-Сибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЗСУГМС) о толщине ледяного покрова, расходах и уровнях воды рр. Томь (посты в г. Томск), Чулыма (сс. Балахта, Зырянское, Батурино, Коммунарка), Кия (г. Мариинск), Мрас-Су (г. Мыски), Кондома (с. Кузедеево), Уса (г. Междуре-

ченск); 2) информация ЗСУГМС о среднесуточной температуре атмосферного воздуха на метеостанциях Томск, Новокузнецк, Тисуль, Зырянское, Первомайское, Красноярск, Кузедеево, Кондома, Усть-Кабырза; 3) материалы эпизодических наблюдений ОАО «Томскгеомониторинг» за толщиной ледяного покрова р. Томь. Выбор перечисленных выше рек обусловлен сочетанием высокой вероятности заторных явлений и наличия необходимой гидрологической и метеорологической информации. Положение гидрологических постов приведено на рис. 1.

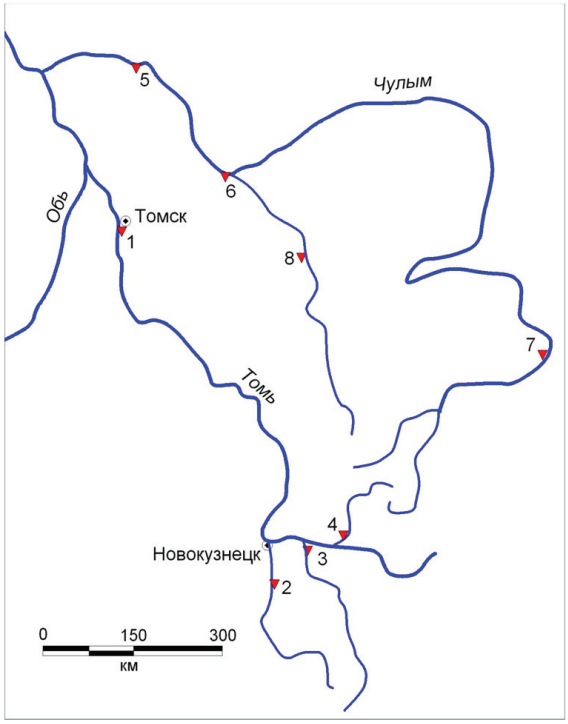


Рис. 1. *Схема размещения пунктов наблюдений за ледовыми заторами: 1) р. Томь – г. Томск; 2) р. Кондома – с. Кузедеево; 3) р. Мрас-Су – г. Мыски; 4) р. Уса – г. Междуреченск; 5) р. Чулым – с. Батурино; 6) р. Чулым – с. Зырянское; 7) р. Чулым – с. Балахта; 8) р. Кия – г. Мариинск*

Результаты исследования

Изучением ледотермических речных процессов в разное время плодотворно занимались Л.Г. Шуляковский, В.А. Бузин, М.А. Жукова, О.Ф. Васильев, А.А. Атавин, С. Белтос и многие другие авторы, внесшие существенный вклад в развитие теории формирования и разрушения ледяного покрова рек и разработавшие целый ряд математических моделей ледовых заторов и зажоров [4–6]. Однако вследствие объективной сложности исследуемых ледотермических процессов и проблем с определением параметров применение данных моделей существенно ограничено. В результате этого в инженерных изысканиях и гидрологических прогнозах на территории Российской Федерации обычно используют упрощённые способы определения подпора воды ΔZ при зажорах или заторах, основанные на модификации формулы Шези-Маннинга применительно к заторному руслу или гидравлическом подобии образования ледовых заторов на реках, а также эмпирические зависимости. Например, согласно [7, 8], для решения практических задач рекомендуется уравнение:

$$\Delta Z = (\mu S_Q^{0,3} - 1)h_Q, \qquad (1)$$

где μ – коэффициент зажорности или заторности речного участка; определяется путем полевых исследований, по аналогии или ориентировочно по справочным данным; S_Q – уклон водной поверхности (‰); h_Q – средняя глубина реки (м) в расчетном створе при расходе Q и свободном ото льда русле; ΔZ в метрах. Коэффициент μ в ур. (1) зависит от соотношения ширины потока и коэффициентов шероховатости при заторе и открытом русле, а также от уклона водной поверхности при заторе (зажоре), то есть от параметров, которые также определить весьма сложно (трудности оценки параметров ледовых заторов иллюстрирует рис. 2). По этой причине указанный выше способ, как и многие другие, позволяет получить удовлетворительные результаты далеко не всегда.



Рис. 2. *Фрагмент заторного участка р. Томь выше г. Томск 29.04.2010 г.; ширина зоны наводнения от 1,5 до 4 км*

В рассматриваемой работе для решения проблемы прогноза подпора воды в условиях дефицита достоверной гидрологической информации предлагается подход, базирующийся на схематизации профиля заторного участка реки (рис. 3) при следующих допущениях.

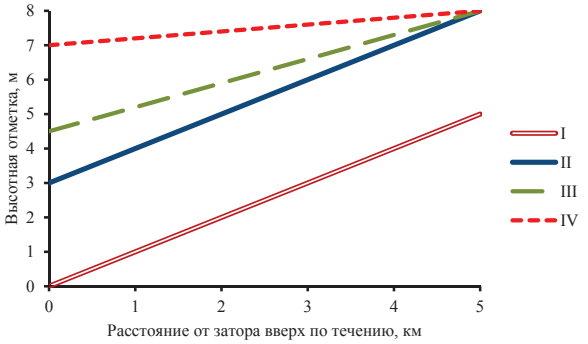


Рис. 3. *Схема продольного профиля заторного участка реки при расходе воды Q; поверхности: I) дна реки; II) водной поверхности при открытом русле; III) нижней поверхности ледяных образований; IV) водного потока при ледовом заторе*

Во-первых, предположим, что подпор пропорционален изменению уклона воды при заторе по сравнению с открытым руслом:

$$\Delta Z = k_1 L_J (S_O - S_J), \qquad (2)$$

где k_1 – эмпирический коэффициент; L_J – длина заторного участка; S_O и S_J – уклоны водной поверхности при открытом русле и заторе при одном и том же расходе воды. *Во-вторых*, выразим уклон S_O через соотношение расхода воды Q в момент формирования затора и нормы стока Q_a:

$$S_O = k_2 S_a \frac{Q^2 M_a^2}{Q_a^2 M^2} \approx k_3 \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{k_4}, \qquad (3)$$

где k_2, k_3, k_4 – эмпирические коэффициенты; S_a – средний уклон реки; M и M_a – модули расходов Q и Q_a (Q^2=SM^2). *В-третьих*, допустим, что: а) S_J=S_O при отсутствии льда (при толщине ледяного покрова Λ=0); б) S_J=0 при максимальной толщине ледяного покрова (Λ=Λ_{max}+δ); в) поправка к максимальной толщине льда δ пропорциональна среднему уклону реки (δ=k_5S_a); г) максимально возможная толщина ледяного покрова (при полном промерзании) равна глубине водотока $h(Q)$. Тогда при указанных ограничениях можно записать:

$$S_J \approx S_O \left(1 - \frac{\Lambda}{h(Q) + k_5 S_a}\right), \qquad (4)$$

а ур. (2, 3) преобразовать к виду:

$$\Delta Z = k_6 \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{k_4} \frac{\Lambda}{h(Q) + k_5 S_a}, \qquad (5)$$

где k_6 – эмпирический коэффициент.

Измерение толщины ледяного покрова в момент вскрытия рек представляет собой достаточно сложную задачу, в связи с чем в ур. (5) целесообразно использовать косвенную оценку величины Λ в зависимости от температуры атмосферного воздуха на основе формулы Ф.В. Быдина [9]:

$$\Lambda = k_7 \cdot \sqrt{\left|\sum T_d\right|}, \qquad (6)$$

где k_7 – эмпирический коэффициент; T_d – средняя суточная температура воздуха.

Апробация рассматриваемого подхода проводилась в два этапа:

1) статистический анализ данных о толщине ледяного покрова и расходах воды рек Томь у г. Томск, Чулым у сёл Балахта, Зырянское, Батурино (Коммунарка), Кия у г. Мариинск, Мрас-Су у г. Мыски, Кондома у с. Кузедеево, Уса у г. Междуреченск на последний день месяца за период устойчивого ледостава (с декабря по март-апрель), материалов о среднесуточной температуре атмосферного воздуха на ближайших к гидрологическим постам метеостанциях и определение коэффициента k_7;
2) оценка взаимосвязей между подпором воды при заторах, толщиной ледяного покрова, температурой атмосферного воздуха, расходами воды, шириной и глубиной потока и определение коэффициентов k_4, k_5, k_6 в ур. (5).

Для упрощения методики и учёта эффекта стаивания льда вместо суммы отрицательных температур атмосферного воздуха с начала ледостава, использованной Ф.В. Быдиным [9] для расчёта толщины льда при наличии снегового покрова, выполнялся расчёт суммы среднесуточных температур (как отрицательных, так и положительных) с 1 октября предыдущего календарного года до первого дня формирования ледового затора ΣT_d. В результате методом наименьших квадратов получена формула для определения толщины ледяного покрова на изученных реках в виде:

$$\Lambda = (0{,}01766 \pm 0{,}00030) \sqrt{\left|\sum T_d\right|}, \qquad (7)$$

где Λ в метрах, T_d – в °С; квадрат корреляционного отношения R^2 составляет 0,44, что свидетельствует об удовлетворительном качестве методики (критическое значение R^2=0,36). Попытки найти зависимости Λ от суммы отрицательных температур воздуха и высоты снежного покрова на льду согласно рекомендациям [9, 10] не привели к положительному результату.

На втором этапе был выполнен статистический анализ различных вариантов для определения коэффициентов k_4, k_5, k_6 в ур. (5) – функций от скорости течения, глубин и ширины водотока по данным измерений, толщины льда на 31 марта текущего календарного года, фиксированных значений k_4 и k_5. В итоге наибольшее значение R^2=0,37 при условии, что коэффициенты регрессии превышают по модулю удвоенную погрешность их определения, было получено для зависимости:

$$\Delta Z = (0{,}935 \pm 0{,}118) \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{1{,}75} \frac{\Lambda}{h(Q) + 0{,}6 S_a}. \qquad (8)$$

где величина Λ рассчитывается по ур. (7) в метрах; расход воды Q в м^3/с; подпор ΔZ и глубина реки $h(Q)$ при открытом русле и расходе воды Q – в метрах; средний уклон реки S_a – в ‰.

Использование ур. (8) позволяет получить в целом приемлемый по точности прогноз подпора воды при ледовых заторах и в первом приближении наметить виды и объёмы руслоисправительных работ. Например, моделирование гидрологических условий на р. Томь позволяет сделать следующие выводы: 1) при углублении русла реки на 2 м опасность ледовых заторов сохранится, но подпор снизится примерно на 20 % (рис. 4); 2) при наличии существующих тенденций русловых процессов, способствующих возникновению осерёдков в русле р. Томь в черте г. Томск и уменьшению средней глубины, следует ожидать повторение мощных ледовых заторов и наводнений, аналогичных затору и наводнению в 2010 г. (рис. 2); 3) значительный подпор (более 1...1,5 м) при неблагоприятных условиях может наблюдаться уже при толщине льда 0,3...0,4 м.

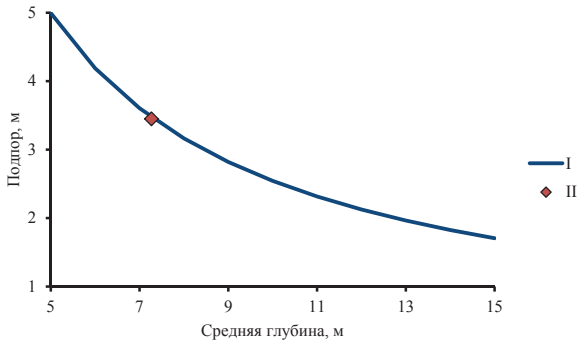


Рис. 4. *Зависимость подпора воды ΔZ на р. Томь у г. Томск от средней глубины в условиях ледового затора 29.04.2009 г. (принятое расчётное значение толщины льда по ур. (7) Λ=0,9 м; Q=8000 м^3/с): I) результаты моделирования; II) фактический подпор воды (рис. 2)*

Заключение

1. Разработан и апробирован метод расчёта подпора воды при ледовых заторах в зависимости от соотношения срочного и среднемноголетнего расходов воды, глубины потока при открытом русле, среднего уклона реки и суммы среднесуточных температур атмосферного воздуха (с 1 октября предыдущего календарного года).
2. Ледовые заторы на рр. Томь, Уса, Мрас-Су, Кондома, Чулым, Кия формируются при преобладании динамического фактора (по сравнению с термическим), причём подпор воды 1,0...1,5 м может наблюдаться уже при толщине льда 0,3...0,4 м. В этом случае необходимыми условиями образования ледового затора являются: а) относительно резкое повышение водного стока; б) превышение срочного расхода воды над нормой стока примерно в 3,5 раза и более; в) наличие ледяного покрова на значительной части затороопасного участка реки (на р. Томь – в пределах Томской области).
3. Параметры модели получены для гидрологических условий, характерных для переходных зон между равниной и горными районами Кузнецкого Алатау и Горной Шории. Его использование для рек с иным гидрологическим режимом рекомендуется только после дополнительного уточнения параметров.
4. Анализ результатов моделирования показал, что снижение подпора воды на изученных реках может быть достигнуто при углублении и частичном спрямлении русла. В частности, заметное снижение опасности ледовых заторов и наводнений на р. Томь у г. Томск может быть достигнуто при углублении русла на отдельных участках на 2...3 м и срезке ряда островов в городской черте.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-9800-р_сибирь_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марусенко Я.И., Земцов А.А., Семлянская Л.П. и др. Гидрография Западной Сибири. Т. 1. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1961. – 169 с.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2, Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 408 с.
3. Савичев О.Г., Льготин В.А. Методика оценки уровней вод реки Томь при ледовых заторах и зажорах у г. Томска (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 135–140.
4. Бузин В.А., Болотников Г.И., Филиппов А.М. Заторы и зажоры льда на реках – методы изучения, расчёта и прогноза // Проблемы современной гидрологии / под ред. И.А. Шикломанова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – С. 220–231.
5. Атавин А.А., Зиновьев А.Т., Кудишин А.В. Математическое моделирование гидроледотермического режима зарегулированного участка реки // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: Матер. Междунар. научн. конф. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – С. 371–375.
6. Beltaos S. Progress in the study and management of river ice jams // Cold regions science and technology. – 2008. – № 51. – P. 2–19.
7. СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
8. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. Государственный гидрологический институт / под ред. А.В. Рождественского и А.Г. Лобановой. – СПб.: Нестор-История, 2009. – 193 с.
9. Лебедев В.В. Гидрология и гидрометрия в задачах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1955. – 551 с.
10. Пособие к СНиП 2.05.03-84. «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). – М.: ГУПиКС, 1992. – 374 с.

Поступила 08.09.2011 г.

УДК 550.42:577.4(571.1)

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ВНУТРИГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ТИМИРЯЗЕВСКОГО БОЛОТА (ТОМСК, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

О.Г. Савичев, А.В. Шмаков

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Разработан комплекс для опробования болотных вод на разных глубинах и проведена его апробация на мезотрофном террасном Тимирязевском болоте в районе г. Томска (Западная Сибирь). Установлено, что изменение химического состава болотных вод характеризуется: в разрезе торфяной залежи – минимальными значениями минерализации в верхней части деятельного горизонта; в течение гидрологического года – максимумами либо в весенний период при поступлении микроэлементов, биогенных и органических веществ в болото с поверхностным стоком с прилегающих суходолов, с атмосферными осадками, при растворении твёрдых примесей талыми водами, либо в летний период – при усилении биогеохимических процессов и накоплении в водной среде главных ионов.

Ключевые слова:
Болотные воды, химический состав, вертикальная зональность, внутригодовые изменения, Западная Сибирь.

Key words:
Marsh waters, chemical compound, vertical profile changes, intraannual changes, Western Siberia.

Введение

Таёжная зона Западной Сибири характеризуется высокой заболоченностью. Так, по данным [1] в пределах Томской области общая площадь болот (без учёта заболоченных земель) составляет 116153 км^2 или 37 % территории, в том числе площадь верховых болот – 53492 км^2 (17 % территории Томской области), переходных – 48934 км^2 (15,6 %), низинных – 13727 км^2 (4,4 %). Болота оказывают мощное воздействие на все аспекты формирования и эволюции окружающей среды в регионе [2], что определяет актуальность исследования соответствующих процессов, включая гидрогеохимические. В данной работе, в развитие работ по общей оценке гидрогеохимического состояния болот таёжной зоны Западной Сибири [3], рассмотрены вопросы изучения изменений химического состава болотных вод в течение года и по глубине торфяной залежи.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью понимания механизмов природно-антропогенной трансформации вод и разработки мероприятий по восстановлению нарушенных экосистем. Его целью является выявление закономерностей пространственно-временных изменений химического состава вод болота, расположенного в 2 км на юго-запад от п. Тимирязево и 3,5 км на запад от г. Томска (рис. 1). При этом необходимо отметить, что отбор проб болотных вод с разной глубины торфяной залежи не только является трудоёмкой задачей, но и сопряжён с необходимостью изъятия воды в течение всего года без изменения её химического состава и нарушения структуры водных масс.

Рассматриваемое болото расположено в левобережной части долины р. Томи, залегает на аллювиальных отложениях её второй надпойменной террасы, представленных песками, супесями, суглинками, и характеризуется как мезотрофное сфагново-кустарничково-сосновое. Мощность торфяной залежи составляет от 1 до 4,5 м. Болото находится в зоне влияния первой очереди Томского водозабора подземных вод, что определяет еще один аспект исследования – выявление и анализ изменений окружающей среды под влиянием хозяйственной деятельности [4–7].

Методика исследования

Исследование выполнено в течение 2010–2011 гг. Оно включало: 1) разработку оборудования и технологии отбора болотных вод с различных глубин торфяной залежи без смешения разных слоёв; 2) обустройство пункта наблюдений и проведение опробования болотных вод; 3) определение химического состава болотных вод и анализ полученных материалов.

В рамках решения первой задачи был создан комплекс, состоящий из рабочей колонны, выполненной в виде перфорированной стальной трубы, и пробоотборника – стального цилиндра с приёмным отверстием и резиновыми манжетами, предотвращающими поступление воды с выше- и нижерасположенных горизонтов и обеспечивающими поступление воды с заданной глубины в пластмассовую камеру-накопитель, установленную ниже стального цилиндра. Материалы, из которых выполнены колонна и пробоотборник, обладают определённой устойчивостью к окислению в болотной среде. В целом, в отличие от оборудования для полевого отбора проб болотных вод, используемого в Росгидромете [8], разработанное устройство позволяет: 1) отбирать воду с заданной глубины при минимальном смешении вод с разных горизонтов торфяной залежи; 2) минимизировать контакт пробы болотной воды с атмосферным воздухом; 3) проводить гидрохимические наблюдения в течение всего года, включая период с отрицательными температурами.

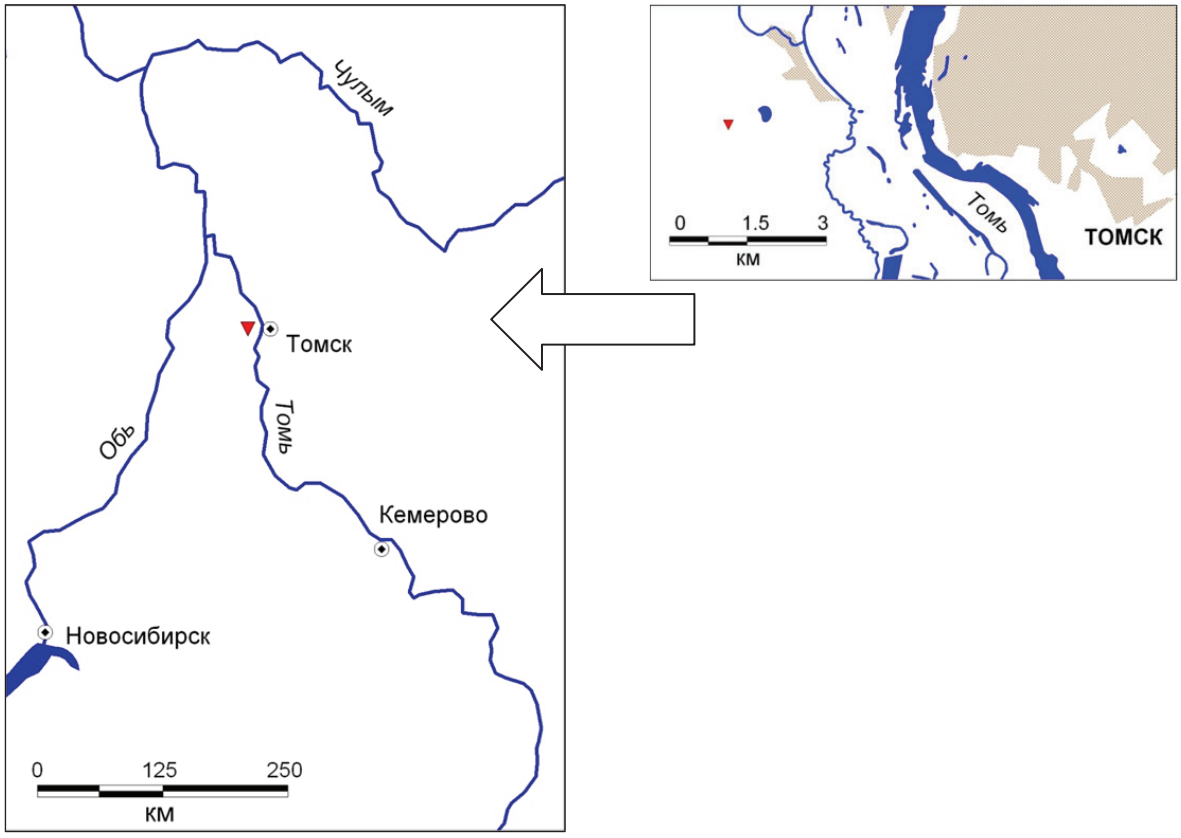


Рис. 1. *Схема размещения участка наблюдений за химическим составом вод Тимирязевского болота у г. Томска*

Непосредственно на Тимирязевском болоте для изучения химического состава болотных вод был выбран участок ряма (сфагново-кустарничково-соснового болота) с мощностью торфяной залежи 4 м, на котором в 100 м от границы болота и суходола установлены скважины в трёх метрах друг от друга. Наблюдения проводились в основные фазы водного режима болота (весеннее половодье, летне-осенняя и зимняя межень) и предусматривали, помимо собственно отбора проб воды, измерение в полевых условиях уровня, температуры, pH, Eh и электропроводности болотных вод. Определение химического состава вод проводилось в аккредитованных лабораториях Томского политехнического университета.

При определении гидрохимических и геохимических показателей использовались следующие методы: удельная электропроводность χ – кондуктометрический; pH и Eh – потенциометрический; SO_4^{2-}, Cl^-, Br – ионная хроматография; Ca^{2+}, HCO_3^-, химическое потребление кислорода (ХПК), фульво- (ФК) и гуминовые (ГК) кислоты, перманганатная окисляемость (П.О.), растворённый углекислый газ – титриметрический; NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, PO_4^{3-}, Si – фотометрический; Na^+, K^+, Ni, Co, Al, Sr, Sb, Ba, Li – атомная абсорбция и атомно-эмиссионная спектрометрия; Cr – атомно-эмиссионная спектрометрия; Zn, Pb, Cd, Cu, Mn, As – инверсионная вольтамперометрия и атомно-эмиссионная спектрометрия. Анализ гидрохимических данных на наличие экстремальных значений проведён согласно [9].

Результаты исследования

Болотные воды на рассматриваемой территории характеризуются в целом как кислые и слабокислые, по классификации О.А. Алёкина [10] – пресные с минерализацией от очень малой (до 100 мг/дм^3) до средней (200...500 мг/дм^3), содержат большое количество органических веществ, по химическому составу – в среднем сульфатные кальциевые (табл. 1).

Изменения содержаний главных ионов и значений pH в разрезе торфяной залежи имеют достаточно сложный характер. Но их минимальные значения в целом приурочены к верхней части деятельного горизонта (рис. 2), что объясняется значительным влиянием атмосферных осадков и талых вод на химический состав болотных вод у поверхности и его постепенным снижением по мере ухудшения фильтрационных свойств торфов и увеличения времени взаимодействия воды с органическими и органоминеральными соединениями.

В нижних слоях торфяной залежи отмечены достаточно сильные колебания минерализации болотных вод, связанные, предположительно, с генетической неоднородностью торфов и, как следствие, неоднородностью их фильтрационных свойств (нижние слои торфяной залежи сформировались на эвтрофной стадии болотообразования, а вышерасположенные – на мезотрофной). Неоднозначное изменение концентраций в вертикальном разрезе также характерно для большинства

Таблица 1. *Средний химический состав болотных вод на участке наблюдений в 2010...2011 гг. по всей глубине торфяной залежи (0...4 м)*

Показатель	Единицы измерения	$ПДК_{хп}$	Подземные воды			Тимирязевское болото	
			зоны аэрации в Обь-Томском междуречье [11]	неоген-четвертичных отложений Томского водозабора [12]	палеогеновых отложений Томского водозабора [12]	$A\pm\delta$	N
pH	ед. pH	6,6...8,5	6,8	7,77	7,26	5,10±0,30	14
CO_2	мг/дм³	–	–	42,1	19,9	166,2±37,2	14
HCO_3^-		–	430	281	345	13,8±7,8	19
SO_4^{2-}		500	9,2	0,41	0,32	15,5±3,0	19
Cl^-		350	25,6	4,09	6,42	8,6±4,1	19
Ca^{2+}		–	121	56,9	75,8	8,7±1,5	19
Mg^{2+}		50	15,5	15,0	14,5	3,3±1,0	19
Na^+		200	18,2 (Na^++K^+)	12,8	14,3	4,0±1,0	19
K^+		–	–	1,22	1,26	2,2±0,4	19
Σ_{mi}		1000	410	375	466	56,1±15,4	19
PO_4^{3-}		3,5	–	–	–	0,042±0,011	15
NO_2^-		3,3	–	0,018	0,004	0,036±0,017	16
NO_3^-		45	–	0,02	0,03	1,012±0,270	16
NH_4^+		1,9	–	0,69	0,62	4,25±0,57	16
Si		10	–	1,57	3,55	4,77±0,70	14
ХПК	мгО/дм³	15	–	1,95	2,04	57,4±8,3	8
ФК	мг/дм³	–	–	–	–	154,1±20,6	8
ГК		–	–	–	–	34,5±11,6	8

Примечание: $ПДК_{хп}$ – предельно допустимая концентрация, установленная для водных объектов хозяйственно-питьевого назначения; A – среднее арифметическое; δ – погрешность определения среднего, $\delta=\sigma N^{-0,5}$; σ – среднее квадратическое отклонение; N – объём выборки; Σ_{mi} – сумма главных ионов.

изученных веществ (NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, Br, Co, Mn, Sr, Zn, Cu, Ba, Ni, F^-, Li, ФК, значений удельной электропроводности и перманганатной окисляемости). Линейные тенденции выявлены только для Si, Al, ГК (уменьшение с глубиной) и Cr (увеличение с глубиной; табл. 2).

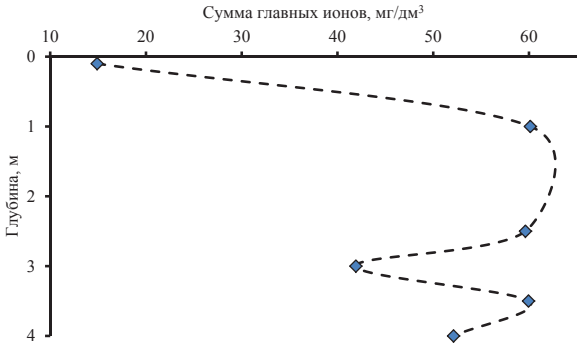


Рис. 2. *Изменение суммы главных ионов в болотных водах 02.05.2011 г. по глубине торфяной залежи (от поверхности)*

Подобное распределение веществ в болотных водах в определённой степени может быть связано с атмогенным химическим загрязнением торфов, что доказывается в работе [13], либо с колебаниями уровней подземных вод вследствие работы Томского водозабора [6, 7]. Однако более значительное влияние на уровень содержания веществ в водах на разных глубинах оказывают собственно процессы болотообразования в условиях избыточного увлажнения, низкой теплообеспеченности и слабой дренированности территории. Биогеохимические аспекты этого влияния достаточно подробно раскрыты в работах О.Л. Лисс, В.К. Бернатониса, Л.И. Инишевой, Н.М. Рассказова, В.С. Архипова и многих других [1–3, 14–16]. В частности, О.Г. Савичевой и Л.И. Инишевой [16] показано, что ферментативаная активность торфов характерна для торфяной залежи на любых глубинах, из чего следует вывод о постоянной потенциальной возможности трансформации органического вещества, фактическая реализация которой наблюдается только при определённых условиях. На наш взгляд, эти условия определяются, прежде всего, водным режимом болота, который, как правило, характеризуется некоторой устойчивостью к внешним воздействиям.

В рассматриваемом случае эти воздействия, согласно [6], связаны с образованием депрессионной воронки в результате эксплуатации Томского подземного водозабора. При этом следует отметить, что анализ динамики уровней подземных вод на режимных скважинах в районе исследуемого болота (скв. 340р – аллювиальные отложения, среднее значение уровня подземных вод 93,33 м в Балтийской системе высот (БС), средняя глубина – 17,87 м; скв. 386р – водоносные отложения четвертичного и палеогенового возраста, средний уровень подземных вод – 77,53 м БС, средняя глубина – 14,66 м) не позволили сделать вывод о сколько-нибудь значительных многолетних изменениях гидродинамических условий в течение последних тридцати лет (рис. 3). Тем не менее, влия-

Таблица 2. *Химический состав болотных вод в скважине № 1*

Показатель	Единицы измерения	Дата отбора пробы									
		27.04.11				02.05.11					
		Глубина отбора, м									
		0,1	0,5	1,0	1,5	0,1	1,0	2,5	3,0	3,5	4,0
pH	ед. pH	3,81	5,62	5,31	5,4	–	–	5,93	–	–	–
χ	мкСм/см	70,4	108,8	46,6	131,0	–	–	116,6	–	–	–
CO_2	мг/дм^3	59,8	174,6	154,0	400,4	–	–	255,2	–	–	–
HCO_3^-		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
SO_4^{2-}		2,3	22,7	36,8	22,7	3,2	11,8	17,9	11,2	9,6	13,4
Cl^-		2,0	1,8	1,1	3,0	1,7	17,7	11,5	9,0	15,1	10,6
Ca^{2+}		6,8	3,0	1,4	1,7	5,1	10,4	8,7	7,0	11,8	10,0
Mg^{2+}		0,3	0,6	0,4	0,4	1,4	2,5	2,3	1,8	3,4	2,5
Na^+		0,5	1,5	0,9	1,4	0,9	11,2	11,5	8,2	14,0	10,7
K^+		0,5	2,2	1,2	1,7	1,2	5,1	6,2	3,3	4,6	3,5
Σ_{mi}		13,9	33,2	43,2	32,3	14,9	60,1	59,6	41,9	60,0	52,1
PO_4^{3-}		0,144	0,016	0,020	0,018	0,040	0,040	0,070	0,012	0,010	0,022
NO_2^-		0,005	0,009	0,006	0,003	0,002	0,018	0,020	0,008	0,026	0,021
NO_3^-		1,850	4,140	0,120	0,075	0,075	1,220	0,670	0,077	0,170	0,220
NH_4^+		3,36	1,09	1,70	2,14	0,92	6,77	4,91	5,99	6,82	6,57
Si		4,91	4,21	4,10	3,46	–	–	4,84	–	–	–
П.О.		97,6	107,2	103,2	91,2	–	–	–	–	–	–
ФК		–	123,6	136,1	125,6	–	–	–	–	–	–
ГК		–	20,4	14,1	10,1	–	–	–	–	–	–
F^-		0,10	0,10	0,11	0,32	0,13	0,25	0,11	0,13	0,29	0,24
Li	мкг/дм^3	0,5	1,8	2,9	3,1	7,4	7,4	2,0	4,3	4,4	3,7
Zn		8,1	6,9	4,6	12,4	–	–	8,7	–	–	–
Cd		0,1	7,0	3,0	6,0	–	–	9,0	–	–	–
Pb		0,8	10,0	8,0	38,0	–	–	10,0	–	–	–
Cu		15,0	9,0	17,0	94,0	–	–	163,0	–	–	–
As		–	2,5	2,5	2,5	–	–	2,5	–	–	–
Mn		–	545	381	832	–	–	222	–	–	–
Al		–	635	567	529	–	–	673	–	–	–
Ba		–	43,0	77,0	41,0	–	–	38,0	–	–	–
Co		–	8,0	5,0	26,0	–	–	54,0	–	–	–
Cr		–	3,0	4,0	15,0	–	–	28,0	–	–	–
Ni		–	176,0	38,0	247,0	–	–	183,0	–	–	–
Sb		–	2,5	2,5	2,5	–	–	8,0	–	–	–
Sr		–	62,0	54,0	68,0	–	–	58,0	–	–	–
Br		–	230	63	12	63	63	39	27	57	49

Примечание: уровень болотных вод по состоянию на 27.04.2011 г. составил 27 см ниже поверхности болота, а 02.05.2011 г. – 26 см.

ние водозабора отрицать нельзя, поскольку выявленные авторами в течение 2010–2011 гг. колебания уровней вод Тимирязевского болота (0,3....1,5 м) существенно превышали соответствующий диапазон колебаний уровней воды на Васюганском болоте (0,2...0,7 м).

Таким образом, можно предположить, что неоднозначное изменение химического состава болотных вод по глубине торфяной залежи определяется, прежде всего, средним уровнем болотных вод и амплитудой его природно-антропогенного изменения, определяющими положение границы доступа кислорода и смену фильтрационных свойств торфов, иными словами – границу биогеохимических барьеров – главных факторов увеличения концентраций ряда веществ в слоях торфяной залежи.

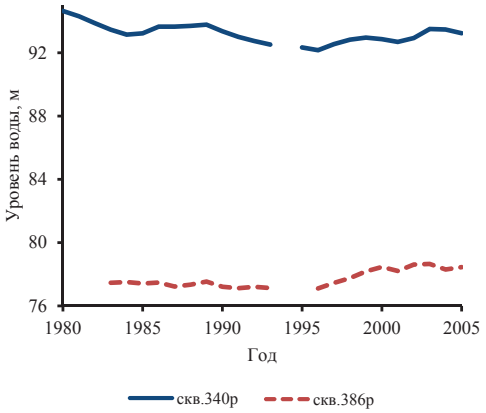


Рис. 3. *Изменение уровней подземных вод за многолетний период*

Изучение временных изменений химического состава болотных вод позволило установить, что максимальное содержание большинства веществ отмечается либо в весенний (Na^+, K^+, PO_4^{3-}, NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+, Si, перманганатная окисляемость, ХПК, ГК, ФК, Zn, Cd, Pb, Cu), либо в летний (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, сумма главных ионов Σ_{mi}) периоды (табл. 3).

Таблица 3. *Химический состав болотных вод в скважине № 2 на глубине 1,65...1,70 м*

Показатель	Единицы измерения	Дата отбора			
		22.05.10	07.08.10	04.12.10	17.04.11
Уровень вод	см (от поверхности)	102	27	150	26
Высота поверхности болота	см (в усл. системе высот)	508	478	463	476
pH	ед. pH	5,09	6,82	6,53	6,49
χ	мкСм/см	91,7	334	174,1	241
Eh	мВ	203	14	–	60
CO_2	мг/дм³	111,3	77,4	18,5	160,2
HCO_3^-		12,2	141,5	31,7	<3
SO_4^{2-}		14,8	49,2	29,5	23,6
Cl^-		4,3	78,3	<1	1,8
Ca^{2+}		5,6	28,0	15,7	9,8
Mg^{2+}		4,1	18,7	6,7	5,0
Na^+		2,6	1,0	2,3	1,4
K^+		1,6	1,3	1,0	0,9
Σ_{mi}		45,2	318,0	87,2	43,9
PO_4^{3-}		0,025	0,019	–	0,005
NO_2^-		0,2	0,01	–	0,225
NO_3^-		1,72	0,94	–	0,3
NH_4^+		6,5	2,67	–	1,89
Si		8,17	0,92	1,89	1,54
П.О.	мгО/дм³	62	27,2	–	28,8
ХПК		206,8	–	–	55
ФК	мг/дм³	120,12	92,4	–	–
ГК		97,1	8,5	–	–
F-		0,05	0,26	–	0,13
Li	мкг/дм³	3,0	3,5	4,0	0,5
Zn		370,0	5,9	0,0	5,9
Cd		0,87	0,01	0,00	0,10
Pb		16,0	0,1	0,0	0,2
Cu		1000,0	8,9	0,0	5,0

Этот факт объясняется, с одной стороны, поступлением ряда веществ с талыми водами и поверхностным стоком с суходолов (в том числе, в результате растворения пылевых частиц кислыми талыми и болотными водами), а с другой стороны – усилением биохимических процессов в летний период при наиболее оптимальных условиях развития макро- и микрофлоры. Именно в летние месяцы увеличивается насыщение болотных вод деятельного горизонта кислородом, возрастает интенсивность трансформации органических веществ и происходит смещение углеродного баланса в сторону увеличения концентраций гидрокарбонат-иона и, как следствие, общей минерализации.

Заключение

Разработаны и апробированы оборудование и технология отбора проб болотных вод с разных глубин торфяной залежи, позволяющие проводить гидрохимические наблюдения в течение всего года и минимизировать вероятность смешения вод с разных горизонтов торфяной залежи и контакта пробы болотной воды с атмосферным воздухом.

Изменение химического состава вод Тимирязевского болота (в районе г. Томска) в разрезе торфяной залежи характеризуется минимальными значениями минерализации в верхней части деятельного горизонта. В течение гидрологического года максимумы содержания микроэлементов, биогенных веществ и органических кислот в болотных водах отмечаются в весенний период вследствие поступления соответствующих веществ в болото с поверхностным стоком с прилегающих суходолов, с атмосферными осадками, при растворении твёрдых примесей талыми водами. Наибольшие концентрации главных ионов (за исключением Na^+ и K^+) наблюдаются в летний период при усилении биогеохимических процессов.

Подобные пространственно-временные изменения химического состава болотных вод обусловлены, прежде всего, процессами болотообразования и трансформацией органического вещества, которые, в свою очередь, связаны как с естественными (избыточное увлажнение, относительно низкая теплообеспеченность и слабая дренированность рассматриваемой территории, способствующие образованию торфа), так и с антропогенными факторами. К последним относятся, преимущественно, увеличение амплитуды колебаний уровней болотных вод в зоне влияния подземного водозабора, а также химическое загрязнение через атмосферу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин А.Е., Базанов В.А., Савичев О.Г. Принципы разработки кадастра торфяных болот (на примере районов нефтедобычи Томской области) // Охрана природы / под ред. А.Е. Березина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – С. 13–26.
2. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. Б.В. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
3. Савичев О.Г. Химический состав болотных вод на территории Томской области (Западная Сибирь) и их взаимодействие с минеральными и органоминеральными соединениями // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 72–77.
4. Пьявченко Н.И. Типы болотных лесов Томского стационара // Особенности болотообразования в некоторых лесных и предгорных районах Сибири и Дальнего Востока / под ред. Н.И. Пьявченко. – М.: Наука, 1965. – С. 97–113.
5. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. и др. Природноресурсное районирование Томской области / под ред. В.Н. Воробьёва. – Томск: Изд-во «Спектр», 1997. – 40 с.
6. Состояние геологической среды на территории Томской области в 2000 г. / под ред. В.А. Льготина. – Томск: ТЦ Томскгеомониторинг, 2001. – Вып. 6. – 180 с.
7. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск: ТФ ИГНГ СО РАН, 2003. – 21 с.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. Гидрометеорологические наблюдения на болотах / под ред. С.М. Новикова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 360 с.
9. РД 52.24.622-2001. Методические указания. Проведение расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. – М.: Федер. служба России по гидрометеор. и монитор. окруж. среды, 2001. – 68 с.
10. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 444 с.
11. Ермашова Н.А. Природный гидрогеохимический фон верхней гидродинамической зоны Среднего Приобья как основа оценки ее экологического состояния // Обской вестник. – 1999. – № 3/4. – С.106–112.
12. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
13. Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск: Томск. политехн. ун-т, 2009. – 22 с.
14. Бернатонис В.К., Архипов В.С., Здвижков М.А., Прейс Ю.И., Тихомирова Н.О. Геохимия растений и торфов Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 204–215.
15. Бахнов В.К. Биогеохимия болотного почвообразования // Болота и биосфера. Матер. V научной школы / под ред. Л.И. Инишевой. – Томск: Изд-во ЦНТИ, 2006. – С. 8–18.
16. Savicheva O.G., Inisheva L.I. Biochemical Activity of the Peat Soil of a River Marsh Ecosystem // Contemporary Problems of Ecology. – 2008. – V. 1. – № 6. – P. 667–673.

Поступила 07.10.2011 г.

Технология и техника геологоразведочных работ

УДК 622.26

ПОВЫШЕНИЕ ФОНДООТДАЧИ САМОХОДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ МНОГОЗАБОЙНОЙ ПРОХОДКЕ РАЗВЕТВЛЕННЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

В.Г. Лукьянов, А.В. Панкратов

Томский политехнический университет
E-mail: lev@tpu.ru

Показана экономическая эффективность многозабойной организации работы звеньев, управляющих работой самоходного оборудования.

Ключевые слова:
Технология горного производства, эффективность многозабойной организации работы звеньев, самоходное оборудование экономическая, проходческий цикл.

Key words:
Mining technology, economic efficiency, multibottomhole operation system, self-powered equipment, sinking cycle.

Несмотря на общее снижение объемов горно-проходческих работ, повышение фондоотдачи капиталоемкого самоходного оборудования, действующего на добычных и разведочных горизонтах (буровые каретки (БК), погрузочно-доставочные (ПДМ) и породопогрузочные машины (ППМ), перегружатели и т. д.), является по-прежнему актуальной задачей.

Результаты проходки эксплуатационных [1–3] и горно-разведочных [4–6] выработок на золоторудных и россыпных месторождениях Сибири и Северо-Востока для условий Майской и Дукатской геолого-разведочных экспедиций ПГО «Севвостгеология» (Магаданская область) показывают, что использование самоходного оборудования только в одном забое малоэффективно. Производительность труда проходчиков комплексной бригады при этом возрастает незначительно, а себестоимость проведения выработок выше по сравнению с применением обычных комплексов на базе переносного бурового оборудования (ручные перфораторы, ППМ, состав вагонеток и аккумуляторный электровоз).

Наличие необходимого фронта работ при сооружении разветвленных систем горизонтальных выработок и техническая производительность существующих самоходных машин позволяет последним обслуживать за смену несколько смежных забоев, что приводит к уменьшению внутрисменных простоев и повышению фондоотдачи проходческого оборудования. Но, поскольку, такая организация работ подразумевает специализацию звеньев комплексной проходческой бригады на выполнении основных операций цикла, то возникает проблема минимизации простоев этих звеньев при переходе вместе с соответствующим оборудованием в другой действующий забой, в котором еще не закончена предшествующая данному процессу операция проходческого цикла.

Опыт проведения выработок с применением комплексов самоходного оборудования свидетельствует о том, что основным резервом повышения эффективности проходческих работ при установленных рациональных параметрах буровзрывных работ является не повышение производительности по одному какому-либо процессу цикла, а уровень многозабойного использования каждой из машин, входящих в состав комплекса. На практике это требует более четкой взаимо-увязки между собой смежных операций проходческого цикла по сравнению с базовой схемой организации работ, когда буровое либо погрузочное оборудование периодически простаивает в данном забое либо на призабойной тупиковой разминовке в ожидании фронта работ.

В работе [6] была предложена методика расчета графика организации работ, позволяющая минимизировать простои основного проходческого обо-

рудования при эксплуатации последнего в течение смены в нескольких смежных забоях. Идеи предложенного подхода были впоследствии развиты в работе [7], что позволило оценить то максимально-допустимое расстояние между смежными забоями, при превышении которого такая организация работ становится не эффективной. В настоящей работе обобщаются результаты предыдущих исследований на случай, когда звенья уборки (с ПДМ или ППМ и перегружателем), бурения (с БК) и заряжания-взрывания шпуров работают в течение смены в нескольких удаленных друг от друга забоях разветвленной системы выработок, имеющей древовидную структуру. Построение графика организации работ и расчет периодических простоев оборудования (после переезда в другой забой) при его эксплуатации в нескольких смежных забоях предложено производить с помощью следующей системы аналитических зависимостей:

$$T_{Ц} = n_3 \max\{T_{Ц_0}/n_3, T_{jm} + \overline{T}_{пер\,jm}\}; \quad (1)$$

$$T_{ПР.Ц_j} = \sum_{K=1,n_3} T^{j}_{ПР.ЗВi_Ki_{K+1}} = n_3[T_{\max} - (T_j + \overline{T}_{пер_j})]; \quad (2)$$

$$T^{j}_{ПР.ЗВi_Ki_{K+1}} = \max\{0, T_{Ц_0} n_3 - (T_{jm} + \overline{T}_{пер\,jm})\} + \Delta T^{j}_{i_Ki_{K+1}}, \quad (3)$$

при условии, что

$$\Delta T^{j}_{i_Ki_{K+1}} = (T_{jm} + T^{jm}_{перi_Ki_{K+1}}) - (T_j + T^{j}_{перi_Ki_{K+1}}) \geq 0;$$

$$T_{jm} + \overline{T}_{пер} = \min_{1\leq j\leq 3}\{T_j + \overline{T}_{пер}\};$$

$$\overline{T}_{пер_j} = \sum_{K=1,\ n_3} T_{пер_Ki_{K+1}} / n_3;$$

$$T_{Ц_0} = T_У + T_Б + T_{З-В} + T_{ПР};$$

$$1 \leq j \leq 3;\ K = 1,2...,n;\ i_{n_{3+1}} = i_1,$$

где $T_Ц$ – продолжительность полного цикла обслуживания n_3 забоев (с возвращением соответствующего специализированного звена (оборудования) в исходный забой i_1, ч; T_{jm} – время наиболее продолжительного из процессов цикла; n_3 – число смежных забоев, обслуживаемых за смену каждым из звеньев; $T_{Ц_0}$ – нормативная продолжительность цикла при последовательном выполнении основных процессов в каждом из n_3 действующих на горизонте забоев по схеме: один забой один комплект забойного оборудования, ч; $T_{ПР.Ц_j}$ – суммарная продолжительность простоев звена, выполняющего j-ю операцию цикла (в ожидании фронта работ после перевода соответствующего оборудования в очередной действующий забой), до полного завершения выполнения последней во всех n_3 забоях, ч; $T^{j}_{ПР.ЗВi_Ki_{K+1}}$ – продолжительность простоя звена (оборудования) после выполнения j-го процесса цикла в i_K-м забое и переходе (переезде) его в очередной i_{K+1}-й забой, ч; T_j – продолжительность выполнения j-го процесса цикла ($T_1=T_У$ – уборки отбитой за взрыв горной массы, $T_2=T_Б$ – бурения шпуров, $T_3=T_{З-Б}$ – заряжания и взрывания шпуров), ч; $T_{ПР}$ – продолжительность проветривания забоя после взрыва, ч; $T^{j}_{перi_Ki_{K+1}}$ – время переезда (перегона) машины, выполняющей j-й процесс цикла, из забоя выработки с номером i_K в забой выработки с номером i_{K+1}, ч; $\overline{T}_{пер_j}$ – среднее время переезда машины (перехода звена), выполняющей j-й процесс цикла, из одного забоя в другой, ч.

Примечания:

1. Поскольку разветвленная сеть сооружаемых выработок имеет древовидную структуру, то последовательность обхода действующих на горизонте забоев $P=(i_1-i_2-...-i_{n_3}-i_{n_3+1}=i_1)$ не имеет значения.
2. Транспортировка между удаленными забоями оборудования на колесно-рельсовом ходу БК или ППМ осуществляется аккумуляторными электровозами.
3. Система уравнений (1–3) приведена для случая, когда расстояние между смежными забоями не менее разрешенного едиными правилами безопасности при взрывных работах (75 м для прямых магистральных выработок и 50 м для искривленных геологоразведочных выработок). Тогда во время заряжения и взрывания шпуров в одном из забоев уборка горной массы или бурения шпуров в других забоях не прекращаются.

В частном случае, когда самоходное оборудование комплекса работает в течение смены не более чем в двух забоях (что позволяет совмещать бурение шпуров в одном из забоев с работами по погрузке, транспортировке горной массы и выполнении вспомогательных операций в другом забое), на основании предложенных зависимостей (1–3) получим:

$$T_{Ц} = 2\max[0{,}5T_{Ц_0}, \max_{1\leq j\leq 3}\{T_j + T_{пер_j}\}]; \quad (4)$$

$$T_{ПР.ЗВ_j} = 0{,}5T_{Ц} - (T_{Ц} + T_{пер}),\ 1 \leq j \leq 3. \quad (5)$$

При подстановке конкретных значений времени выполнения основных операций проходческого цикла в системе (4) и (5) нулевое (либо отрицательное) значение простоя оборудования (когда $T_{ПР.ЗВ_j} \leq 0$) означает простой подготовленного забоя в ожидании прибытия соответствующего проходческого звена (при этом $T_Ц > T_{Ц_0}$). Из приведенных выше формул вытекает, что для того, чтобы время цикла $T_Ц$ (обслуживание нескольких забоев специализированными звеньями) не превышало $T_{Ц_0}$ (последовательное выполнение основных процессов цикла комплексным проходческим звеном), продолжительности переездов соответствующего забойного оборудования $T_{пер_j}$ должны удовлетворять следующим неравенствам:

$$T_{пер_j} = L_З V_{пер_j} \leq (0{,}5T_{Ц_0} - T_j);\ 1 \leq j \leq 3, \quad (6)$$

где $L_З$ – среднее расстояние между забоями сооружаемых выработок в процессе их проходки, м; $V_{пер_j}$ – средняя скорость транспортировки переезда по выработкам забойного оборудования, выполняющего j-й процесс цикла (БК; ППМ (ПДМ) или

перегружателя), которая не должна превышать максимально-допустимой правилами безопасности не более 60 м/мин), м/ч.

Из неравенств (6) следует, что максимальное расстояние $L_{3\max}$ между смежными забоями, при превышении которого перегон оборудования становится нецелесообразным (поскольку время цикла $T_{Ц}$ будет больше нормативного $T_{Ц0}$), не должно превышать наименьшей из величин

$$L_{3\max} \le \min_{1\le j\le 3} \{V_{пер_j}(0{,}5T_{Ц_0} - T_j)\}. \qquad (7)$$

Если $L_З < L_{3\max}$, то $T_{Ц} = T_{Ц0}$, если $L_З > L_{3\max}$, то $T_{Ц} > T_{Ц0}$. Если при подставке конкретных значений в формулу (7) максимальное расстояние перемещения оборудования окажется отрицательным $L_{3\max} < 0$, т. е. $0{,}5T_{Ц_0} < T_{jm}$ (где T_{jm} – время наиболее продолжительного из процессов цикла), то это означает, что использовать данный комплекс машин в двух и более забоях нецелесообразно из-за больших простоев последних в ожидании прибытия проходческих звеньев.

График организации работ звеньев бурения и уборки, управляющих комплексом самоходного оборудования (в составе БК СБКН-2м и ППМ ППН-1с), применявшегося в 1980–1985 гг. при проходке подходных и вскрывающих выработок в организациях ПГО «Севвостгеология» для следующих значений составляющих цикла, можно рассчитать как:

$$T_У = 2{,}3 \text{ ч } (T_{пер_У} = 0{,}2 \text{ ч}); \; T_Б = 2{,}4 \text{ ч } (T_{пер_Б} = 0{,}3 \text{ ч});$$

$$T_{З-В} + T_{ПР} = 1{,}3 \text{ ч и } T_{Ц_0} = 6 \text{ ч}.$$

Подставляя в неравенства (7) соответствующие расчетные данные, получим:

1. Периодические простои (которые на циклограмме отмечаются горизонтальным пунктиром) ППМ (звена уборки) и БК (звена бурения) в ожидании фронта работ после их переезда в смежный забой составят 0,5 и 0,3 ч соответственно. Эти простои допустимы, т. к. не приводят к увеличению продолжительности цикла по сравнению с нормативной, т. е. $T_{Ц} = T_{Ц0} = 6$ ч.
2. Максимальное расстояние между смежными забоями, при котором время цикла остается постоянным и равным нормативному, не должно в процессе проходки превышать для:
   - БК (при средней скорости ее транспортировки по выработкам – 2,5 км/ч) – 1500 м;
   - ППМ (при средней скорости ее перегона – 3,0 км/ч) – 2100 м.

Окончательно для данного комплекса машин в качестве максимального расстояния между обслуживаемыми забоями принимаем минимальную из двух величин, т. е. 1500 м.

Экономическую эффективность многозабойной организации работы звеньев, управляющих работой самоходного оборудования, по сравнению с работой комплексного проходческого звена на базе переносного бурильного оборудования, предложено оценивать с помощью следующей модели приведенных затрат

$$З_{ПР} = \left[\begin{array}{l} \dfrac{T_Ц N_{БР.-СМ}}{n_З l_{УХ}} \times \\ \times \left(\dfrac{N_У C_{Т.У} + N_Б C_{Т.Б}}{N_У + N_Б} \right) K_Н + \times \\ + \dfrac{C_{Л.Г}}{V_Г} + З_{ЗАБ} \end{array} \right] \times$$

$$\times K_{Н.Р} + \frac{З_{К.Г}}{V_Г} \Rightarrow \min; \qquad (8)$$

$$V_г = n_З l_{УХ} S Ч_{Г.УЧ} / T_Ц, \qquad (9)$$

где $З_{ПР}$ – приведенные затраты на проходку по принятому варианту организации работ, р/м^3; $l_{УХ}$ и S – уходка забоя за взрыв и площадь поперечного сечения сооружаемых выработок (проектная или рассчитанная в соответствии с требованиями единых правила безопасности для работы оборудования непосредственно в забое либо для безопасного перемещения его по выработкам), м^2; $N_{БР-СМ}$, $N_У$, $N_Б$ – численность бригадосмены проходчиков, эксплуатирующих принятый комплекс оборудования, и нормы обслуживания соответственно погрузочно-транспортных и буровых машин комплекса (минимально-необходимая численность звеньев уборки и бурения), чел.; $N_У C_{Т.У} + B_Б C_{Т.Б}$ – средние тарифные ставки проходчиков, занятых соответственно уборкой горной массы и бурением шпуров, р/чел.-ч.; $K_Н$ и $K_{Н.Р}$ – коэффициенты начислений на тарифную заработную плату проходчиков и накладных расходов; $C_{Л.Г}$ и $З_{К.Г}$ – годовая сумма прямых эксплуатационных затрат на возмещение износа (амортизации) и приведенных капитальных затрат на приобретение машин комплекса, р; $V_Г$ – планируемые годовые объемы проходки на данный комплекс оборудования, м^3; $З_{ЗАБ.}$ – сумма прямых эксплуатационных затрат, не зависящих от принятого, варианта организации работ (затраты на материалы, сжатый воздух, электроэнергию, на ежесменную доставку горнопроходческой бригады на участок работ, на маркшейдерское обслуживание проходки, на ликвидацию породного отвала и т. п.), р/м^3; $Ч_{Г.УЧ}$ – годовой фонд рабочего времени проходчиков по принятому режиму работы, ч.

Если в каждом из действующих забоев работает комплексное проходческое звено, выполняющее последовательно все операции цикла, а закрепленное за ним оборудование постоянно находится в забое (один забой – один комплекс), то в формулах (8), (9) принимается технологически необходимая численность звена, обеспечивающая наиболее многолюдный процесс цикла (как правило, уборку горной массы, отбитой за взрыв), тогда

$$n_З = 1, \; N_{БР-СМ} = \max\{N_У, N_Б\},$$

$$C_{Т.У}, N_{Т.Б} = \sum_{r=1, N_{БР.-СМ}} C_{Тr} / N_{БР.-СМ},$$

где C_{Tr} – тарифная ставка *r*-го проходчика, выполняющего все операции цикла и имеющего разряд не ниже допускаемого едиными нормами выработки на горнопроходческие работы для бурения шпуров ручными перфораторами, р/чел.-ч.

В случае же многозабойной организации работ со специализацией звеньев на выполнение отдельных операций цикла (один комплекс самоходного оборудования обслуживает за смену несколько забоев) численность бригадосмены равна сумме норм обслуживания бурового и погрузочно-транспортного оборудования соответствующего проходческого комплекса.

$$n_3 = 2,3,...;\ N_{БР.-СМ} = N_У + N_Б;$$

$$C_{Т.У} = \sum_{r=1,\ N_У} C_{Т.У_r} / N_У;\ C_{Т.Б} = \sum_{r=1,\ N_У} C_{Т.Б_r} N_Б,$$

где $C_{Т.Б_r}$ и $C_{Т.У_r}$ – тарифные ставки *r*-го проходчика (или горнорабочего) в звеньях бурения и уборки, управляющего соответствующим буровым или погрузочно-транспортным оборудованием и имеющего разряд, предусмотренный едиными нормами выработки для выполнения данной операции цикла, р./чел.-ч.

Выполненные оптимизационные расчеты для условий Майской и Дукатской геологоразведочной экспедиции ПГО «Севвостгеология» позволили определить следующие рациональные нормативы годовых объемов проходки на один комплекс оборудования:

- 1300...1500 м (108...133 м/мес.) – для обычных комплексов с переносным бурильным оборудованием;
- 1800...2200 м (150...183 м/мес.) – для комплексов с БК СБКН-2М;
- 1700...2100 м (140...175 м/мес.) – для комплексов с переносным оборудованием и перегружателем ГТСК-12000...2500 м (167...208 м/мес.) – для комплексов с электрогидроприводом ПСК-Э (БК УБШ-211 Г, 1ШМГГПН-1Э и проходческие вагоны с донным конвейером ВГЖНЭ-7).

Технологические карты многозабойной проходки горизонтальных выработок, составленные в результате проведенных оптимизационных расчетов для условий Майской геологоразведочной экспедиции (коэффициент крепости пород 14...15; средняя площадь поперечного сечения сооружаемых выработок 5,8 м и т. д.) приведены в Руководстве [9]. При работе по данным технологическим картам достигаются рациональные темпы проходки на бригаду в месяц:

- 125...145 м при работе одним забоем или 165...195 м двумя забоями для обычных комплексов оборудования (перфораторы ПП-30 (ГГП-63) на пневмоподдержках П-13 или распорных колонках ЛКР-У (УПБ-1), ППМ ППН-lc, вагонетки УВГ-1,3 и АЭ 4,5 АРП-2М), задействованных на проходке прослеживающих выработок (штреков и рассечек из них);
- 185...210 м при работе одним забоем или 245...285 м – двумя забоями для комплекса с буровой кареткой СБКН-2М (УБШ-207) и перегружателем ПСК-1, используемого при проходке прямолинейных в плане вскрывающих выработок (штолен и квершлагов).

Передовыми горнопроходческими бригадами Н.С. Нестеренко и С.В. Горбушко, применявшими данные комплексы (за исключением последнего) на этапе детальной разведки Майского золоторудного месторождения, были достигнуты рекордные для отрасли показатели:

- годовые объемы работ (за 10 мес.) на бригаду – 4638 м (464 м/мес.);
- производительность труда на одного проходчика – 19,9 м/чел.-мес.

При этом удалось на 40 % повысить коэффициент использования самоходного проходческого оборудования.

Технологические карты многозабойной проходки горизонтальных выработок, составленные в результате расчетов для условий Майской геологоразведочной экспедиции (коэффициент крепости пород 14...15; средняя площадь поперечного сечения выработок 5,8 м^2), приведены в Руководстве «Проектирование и сооружение выработок разведочных горизонтов», утвержденных бывшим Мингео РСФСР.

Выводы

Оптимизационные расчеты для условий Майской и Дукатской геологоразведочных экспедиций ПГО «Севвостгеология» (Магаданская область) позволили определить рациональные нормативы годовых объемов проходки для золоторудных месторождений на один комплекс оборудования.

Максимальное расстояние между смежными забоями, при котором время цикла остается постоянным и равным нормативному, не должно превышать для:

- буровой каретки при средней скорости ее транспортировки по выработкам 2,5 км/ч – 1500 м;
- породопогрузочной машины при средней скорости ее периода – 3,0 км/ч – 2100 м.

Окончательно максимальное расстояние между обслуживаемыми забоями для данного комплекса машин – не более 1500 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока / А.М. Фрейдин, В.А. Шалауров, А.А. Еременко и др. – Новосибирск: Наука, 1992. – 177 с.
2. Емельянов В.К., Мамаев Ю.А., Кудлай Е.Д. Подземная разработка многолетнемерзлых россыпей. – М.: Недра, 1982. – 240 с.
3. Кудлай Е.Д., Докукин А.К., Поздняков Э.С. Применение комплексов самоходных машин на подземной разработке россыпей // Колыма. – 1987. – № 3. – С. 14–16.
4. Антонов Л.Н., Хорес В.А. Технология буровзрывных работ при проходке разведочных выработок с использованием переносных и самоходных бурильных установок // Техника и технология геологоразведочных работ. Организация производства. Обзор. – М.: ВИЭМС, 1985. – 59 с.
5. Викулов М.А., Егоров И.К., Скрипник И.А., Дубинин В.П. Применение самоходного оборудования на геологоразведочных работах и охрана природы // Минеральное сырье и природа: Тез. докл. Всес. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 1988. – С. 21–22.
6. Панкратов А.В. Перспективы использования самоходного оборудования на подземных горно-разведочных работах в условиях Северо-Востока страны // Проблемы и перспективы развития горного дела на Северо-Востоке СССР: Матер. научно-практ. семин. Ч. 2. – Якутск: ИГД Севера СО АН СССР, 1990. – С. 203–211.
7. Панкратов А.В. Повышение загрузки проходческого оборудования за счет совершенствования ведения горных работ на разведочных горизонтах (на примере золоторудных месторождений Северо-Востока): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск: 1999. – 24 с.
8. Лукьянов В.Г., Панкратов А.В. Повышение фондоотдачи самоходного оборудования при многозабойном проходе разветвленных систем горизонтальных горных выработок // Вестник Российской Академии естественных наук. – 2002. – Вып. 5. – С. 223–230.
9. Лукьянов В.Г. и др. Руководство по технологии и организации скоростного проведения горизонтальных горно-разведочных выработок. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1984. – 189 с.

Поступило 28.04.2011 г.

УДК 621.644

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ГРУНТА, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ПРОКЛАДКИ БЕСТРАНШЕЙНОГО ТРУБОПРОВОДА

С.В. Поварницын, А.В. Рудаченко

Томский политехнический университет
E-mail: povarnit@tpu.ru

Обобщены вопросы определения перемещений грунта, возникающих в процессе прокладки бестраншейного трубопровода. Описана конструкция стенда, разработанная и сконструированная авторами для исследования силовых характеристик, определения перемещений грунта, способа прокола трубопровода в грунте. Приведены рекомендации по подготовке и последующей обработке изображения методом измерения скоростей полей деформаций.

Ключевые слова:
Метод измерения скоростей полей деформаций, горизонтально-направленное бурение, микротоннелирование, методы восстановления трубопроводов, щитовая проходка.

Key words:
Particle image velocimetry, horizontal directional drilling, microtunneling, pipe bursting, pipe jacking.

В настоящее время бестраншейные способы строительства, такие как горизонтально-направленное бурение, микротоннелирование, продавливание и прокол, получили широкое распространение во многих областях строительства, а также промышленного производства. Примерами такого использования являются: в гражданском строительстве – строительство трубопроводов и подземных коммуникаций, в нефтегазовой промышленности – строительство магистральных трубопроводов, в горном деле – сооружение горизонтальных скважин различного назначения.

Экспериментальные исследования в области восстановления трубопроводов бестраншейным способом (*pipe bursting*) проведены B. Lapos [1]. В работе обобщены силовые характеристики и деформационные процессы в грунте при восстановлении трубопровода бестраншейным способом, сущность которого заключается в разрушении старого трубопровода специальным наконечником с одновременным затягиванием нового трубопровода. Описание деформационных процессов в грунте при прокладке бестраншейного трубопровода способом щитовой проходки (*pipe jacking*) выполнено D.N. Chapman [2] и M. Marshall [3].

Актуальность исследования заключается в повышении эффективности использования способа прокола при сооружении бестраншейного трубопровода.

Целью исследования является разработка лабораторного стенда для определения перемещений в грунте при сооружении бестраншейного трубопровода способом прокола.

Для определения перемещений в грунте использовался метод *particle image velocimetry* (*PIV*) [1]. Это метод измерения скоростей, который был изо-

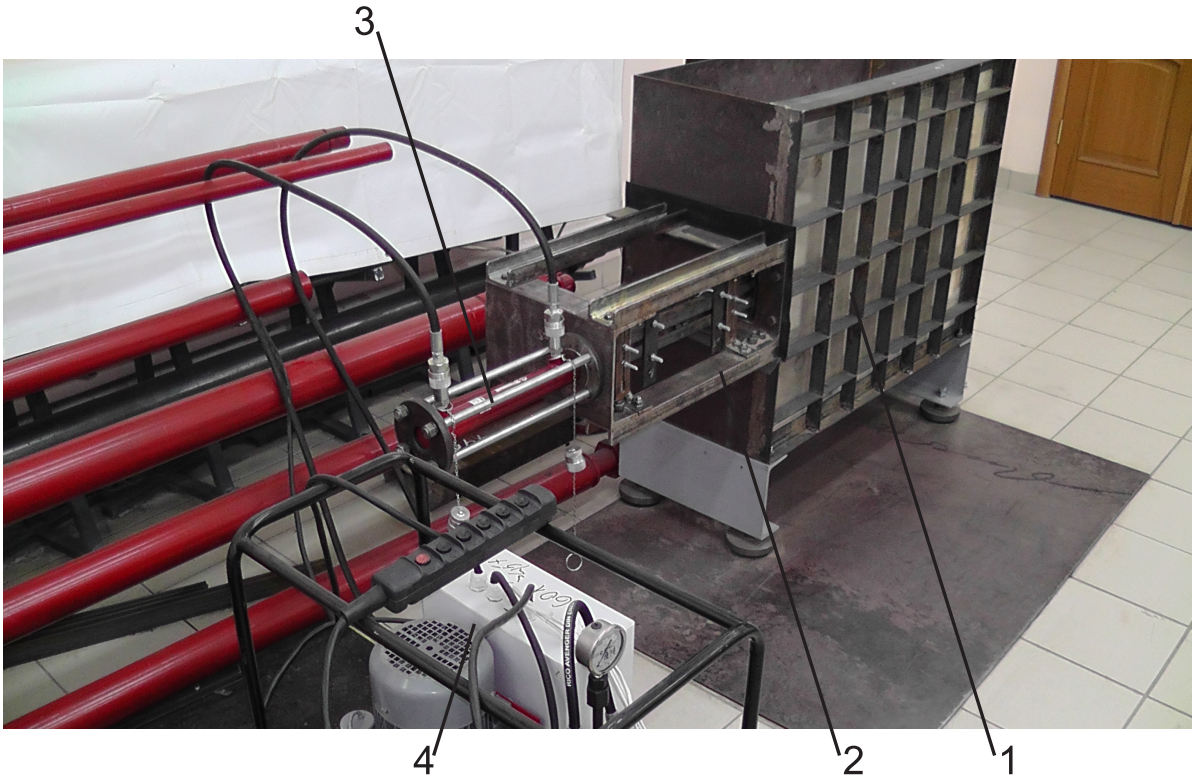


Рис. 1. *Лабораторный стенд: 1) корпус с грунтом; 2) направляющая трубопровода; 3) домкрат; 4) насосная станция*

бретен для экспериментальных исследований в области механики жидкости в 1991 г.; позже метод был адаптирован для использования в геотехнических исследованиях. В отличие от обработки изображения жидкости, где необходимо введение дополнительных маркеров (частиц), грунт имеет свою собственную текстуру в форме гранул различных оттенков, что облегчает обработку изображений. Но при необходимости, возможно, использовать маркеры (окрашенный песок).

Метод *PIV* осуществляется следующим способом: подготавливаются изображения процесса перемещения грунта, данные изображения обрабатываются попарно, после чего суммируется общее перемещение. Обрабатываемые изображения делят на области, содержащие определенное количество пикселей, затем каждая область первого изображения сравнивается с областью второго, а степень соответствия определяется величиной кросс-корреляции. Для определения перемещения рассматриваемой области выполняют поиск максимума функции корреляции [4, 5].

Для определения перемещений грунта при бестраншейной прокладке трубопровода был сконструирован и изготовлен лабораторный стенд, рис. 1. Стенд включает в себя корпус, гидравлическое и контрольно-измерительное оборудование. Корпус состоит из ёмкости с грунтом – 1, направляющей рамы – 2 для размещения гидродомкрата – 3 и трубопровода, передняя стенка корпуса выполнена из полиметилметакрилата. Гидравлическое оборудование состоит из насосной станции – 4, рукавов высокого давления, запорно-распределительного оборудования, гидродомкрата. В состав контрольно-измерительного оборудования входит видеокамера с приспособлениями (штатив, система освещения), микропроцессорный измеритель-регулятор, тензодатчик, конвертор, компьютер.

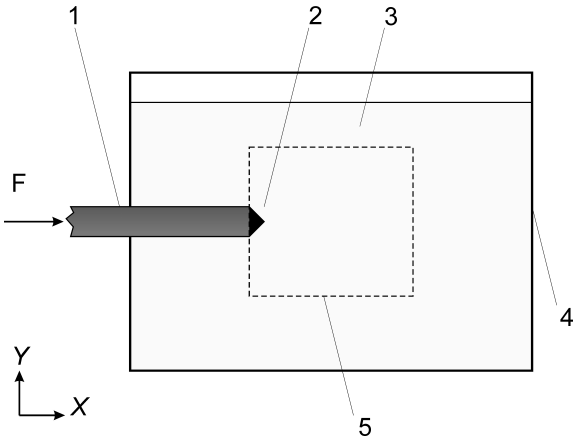


Рис. 2. *Схема проведения эксперимента: 1) сегмент трубопровода; 2) конусный наконечник; 3) грунт; 4) плоскость симметрии; 5) область видеосъемки*

Общая схема процесса внедрения трубопровода с конусным наконечником представлена на рис. 2. Параметры массива грунта в плоскости симметрии: длина 1000 мм, высота 800 мм. Область видеосъемки составила 440×300 мм.

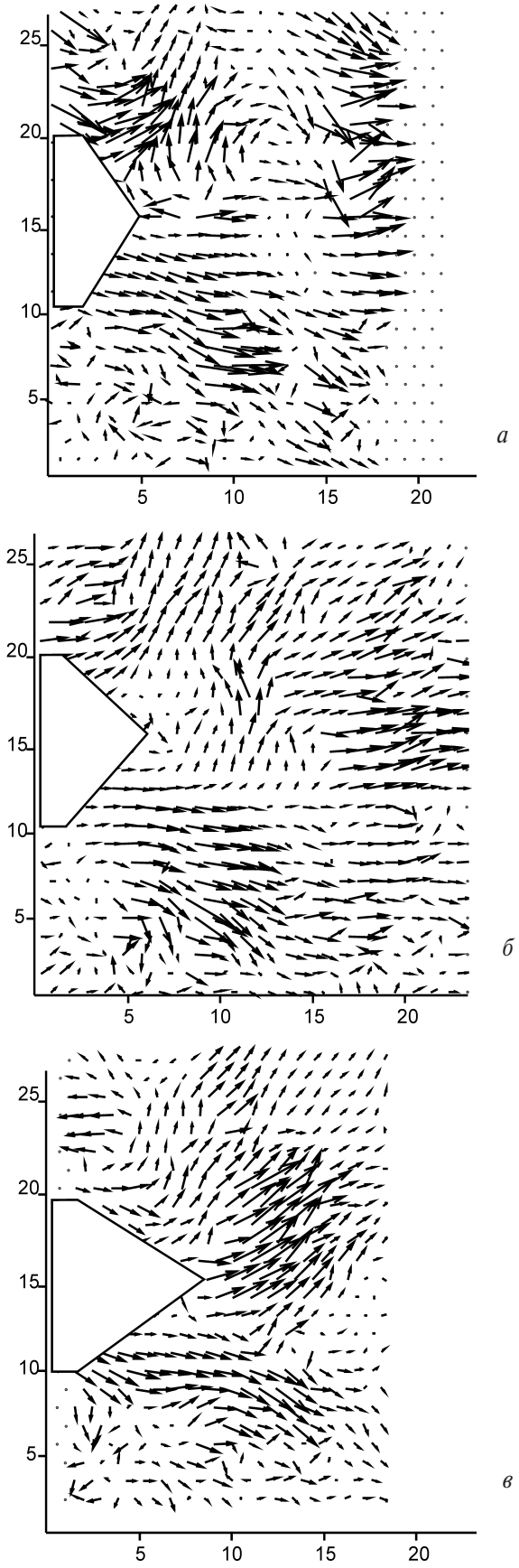


Рис. 3. *Зависимость деформационных процессов в грунте от угла конуса наконечника, см: а) 30; б) 45; в) 60°*

Грунт представляет собой сухой сеяный песок с размером зерен 0,6...1,25 мм, насыпной плотностью 1800 кг/м^3. Трубопровод выполнен в виде сегмента диаметром 100 мм. Конусные наконечники выполнены с углом конуса 30, 45, 60°.

В ходе эксперимента выполнено три операции по вдавливанию трубопровода с наконечником в грунт. Перед каждой операцией восстанавливалось начальное напряженно-деформированное состояния грунта. Процесс передвижения трубопровода в грунте записывался на цифровую видеокамеру с разрешением видеосъемки 1920×1080 и скоростью 25 кадр/с. Оптимальное фокусное расстояние до плоскости симметрии составило 450 мм.

Полученная видеозапись обрабатывалось с использованием специального программного обеспечения (*HD Writter AE* 2.0). Из видеофайла извлекались необходимые стоп-кадры с заранее известным между ними интервалом времени.

Обработка изображений методом *PIV* может быть выполнена с использованием различных программных продуктов с открытыми кодами, например: *MatPIV*, *PIVlab*, *OpenPIV*, *JPIV*, *Gpiv*. Наиболее подходящей программой для решения рассматриваемой задачи является *MatPIV*, т. к. данная программа имеет большое количество фильтров обработки изображения. В процессе обработки изображения были использованы следующие фильтры: *signal to noise ratio filter, peak height filter, global filter, local filter.* Данные фильтры удаляют ложные векторы, образующиеся на изображениях с низким качеством, а области удаленных векторов замещаются интерполяцией соседних.

Результатом эксперимента после обработки изображений являются векторы перемещения грунта, по которым можно судить о характере деформационного процесса. На рис. 3 приведены векторы перемещения грунта для трубопровода диаметром 100 мм с тремя различными наконечниками.

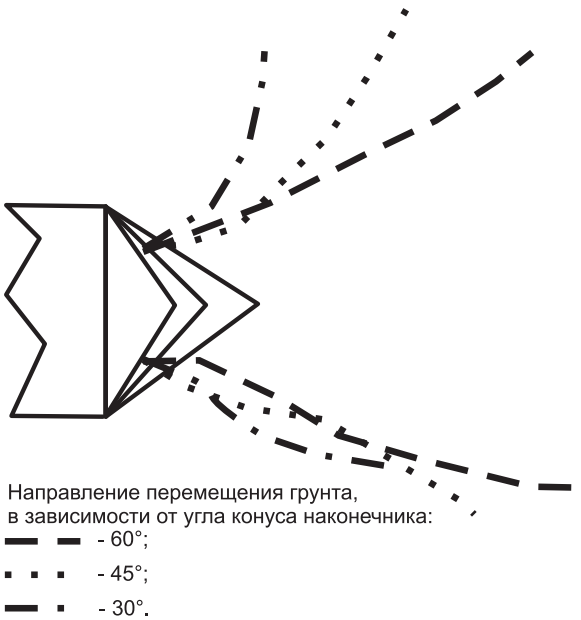


Рис. 4. *Осредненное направление перемещения грунта*

После соответствующей обработки изображений определено осредненное направление перемещения грунта, рис. 4.

По результатам обработки изображения, рис. 3, можно судить о том, что конструкция стенда и программное обеспечение позволяют выполнять исследования на качественном уровне. Основная сложность заключается в правильной оценке толщины и прозрачности полиметилметакрилата, фокусного расстояния видеосъемки, освещенности, выборе программного обеспечения с наличием фильтров обработки изображения.

В перспективе авторы планируют изучить деформационные процессы в грунте при обратном и последовательном расширении скважины, различие деформационных процессов в глинистом и песчаном грунте, влияние неоднородности свойств грунта по разрезу на деформационные процессы.

Выводы

Разработан лабораторный стенд, позволяющий выполнять экспериментальные исследования по определению перемещений грунта при бестраншейной прокладке трубопровода. Для определения деформационных процессов грунта сеяного песка с размером зерен 0,6...1,25 мм использована программа *MatPIV* с последовательным использованием фильтров обработки изображения. Получены поля перемещений грунта для конусных наконечников с варьируемым углом конуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lapos B., Brachman R.W.I., Moore I.D. Laboratory measurements of pulling force and ground movement during a pipe bursting test. 2011. URL: http://nastt.org/store/technical_papersPDF/302.pdf (дата обращения: 03.06.2011).
2. Chapman D.N., Rogers C.D.F. Ground movement associated with trenchless pipelaying operations. 2011. URL: https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/7509 (дата обращения: 03.06.2011).
3. Marshall M. Pipe-Jacked Tunnelling: Jacking Loads and Ground Movements. 2011. URL: http://www-civil.eng.ox.ac.uk/publications/theses/marshall.pdf (дата обращения: 03.06.2011).
4. White D.J., Take W.A., Bolton M.D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry and photogrammetry. 2011. URL: http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/people/bolton/mdb_pub/133_Geotechnique_№ 53_Issue7_619_632.pdf (дата обращения: 03.06.2011).
5. Болдырев Г.Г., Никитин Е.В. Деформация песка в основании полосового шлама // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – № 1. – С. 26–28.

Поступила 20.05.2011 г.

Геоэкология

УДК 550.42

УРОВНИ НАКОПЛЕНИЯ И ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАНТАНОИДОВ И ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ ПОЙМЕННЫХ ПОЧВ ПРОТОКИ ЧЕРНИЛЬЩИКОВО р. ТОМИ

В.Ю. Берчук, Л.П. Рихванов, Ф. Готье-Ляфай*

Томский политехнический университет,
*Центр геохимии поверхности, Университет Луи Пастера, г. Страсбург, Франция
E-mail: berchuk@tpu.ru

Изучены пойменные почвы р. Томи (протока Чернильщиково), находящейся в 30-ти километровой зоне Сибирского химического комбината. Определены уровни концентраций и характер вертикального распределения элементов (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Th, U), выявленных с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа, а также уровни удельных активностей радиоактивных изотопов ^{241}Am, ^{238}Pu, $^{239+240}Pu$, ^{152}Eu, ^{154}Eu, определённых с помощью альфа-спектрометрии. В качестве индикаторов загрязнения рассматриваются Th/U и $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ отношения. Обсуждаются источники, обуславливающие повышенные концентрации элементов в почвах.

Ключевые слова:
Радиоактивные элементы, окружающая среда, уран, торий, лантаноиды, актиноиды, плутоний, америций, европий, пойменные почвы, Сибирский химический комбинат, атомная энергетика.

Key words:
Radioactive elements, environment, uranium, thorium, lanthanides, actinium series, plutonium, americium, europium, floodplain soils, Siberian chemical combine, nuclear power engineering.

Введение

Вопросу изучения уровней накопления и характера распределения лантаноидов и актиноидов в различных компонентах природной среды в настоящее время уделяется большое внимание. Актуальность данного вопроса обусловлена увеличением концентраций элементов группы лантаноидов и актиноидов в окружающей среде. Причиной повышенного содержания этих элементов является техногенез [1, 2].

Основными источниками, увеличивающими концентрации антропогенных лантаноидов и актиноидов, являются испытания ядерного оружия в атмосфере, имевшие место в период с 1950–1963 гг., а также функционирование предприятий ядерно-топливного цикла [3].

Загрязнение техногенными радионуклидами, отмечающееся по всему земному шару, в основном, вызвано испытаниями ядерного оружия в атмосфере, в то время как функционирование предприятий ядерно-топливного цикла, особенно связанное с наработкой оружейного плутония, создает локальное воздействие на близлежащие территории [4–8].

Влияние предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) на окружающую среду фиксируется в различных средах (почва, донные отложения, торф, пылеаэрозольные выпадения). Одним из эффективных индикаторов загрязнения является почва, депонирующие свойства которой позволяют фиксировать загрязняющие элементы за длительный период времени [2, 9].

Опасность повышенных концентраций элементов в почве обусловлена ее участием в обмене веществ и энергией с компонентами биогеоценоза, включением в трофические цепи, влиянием на животных и человека [10]. В связи с этим изучение актиноидов и лантаноидов в почвенном разрезе является актуальным и позволяет оценить уровень загрязнения, характер распределения, динамику поступления элементов и выявить возможные источники загрязнения.

Объекты и методы исследований

Для получения информации об уровнях накопления и характере распределения лантаноидов и актиноидов в пойменных почвах в сентябре 2004 г. сотрудниками Томского политехнического университета совместно с коллегами из Франции (Университет Луи Пастера – ULP, г. Страсбург) был произведен отбор проб пойменных почв. Место опробования расположено на правом берегу протоки Чернильщиково р. Томи, в 30 км зоне влияния Сибирского химического комбината (СХК) (рис. 1). Материал отобран в трех шурфах глубиной 49, 33 и 27 см, расположенных на разном высотном уровне относительно поверхности речной воды и на незначительном удалении друг от друга (рис. 2).

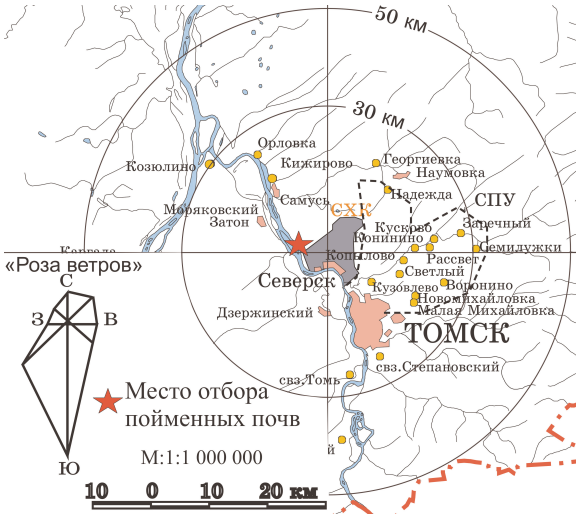


Рис. 1. *Схема расположения пробоотбора*

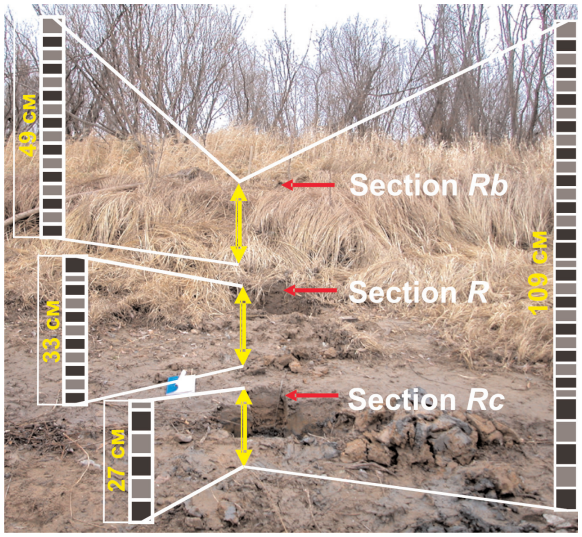


Рис. 2. *Схема отбора проб*

Отбор проб производился с таким учетом, чтобы нижняя проба верхнего профиля находилась на одном уровне с верхней пробой нижележащего профиля, что позволяет изучать все три профиля как один почвенный разрез. Необходимо учитывать то, что переходы между профилями могут явиться причиной изменения характера вертикального распределения элементов.

Отличие вещественного состава одного профиля от другого обусловлено как почвенными процессами, так периодичностью и интенсивностью затопления профилей в периоды весеннего половодья и летне-осенних паводков. Наиболее часто затапливаемым является профиль *Rc*, почвенные пробы которого имеют песчанно-глинистый состав, с преобладанием глинистой составляющей, особенно в нижней части разреза.

Подтопление профиля *R* происходит реже, чем профиля *Rc*. Отмечается преобладание глинистых компонентов в профиле *R*, по сравнению с нижележащим профилем. Кроме того верхние пробы профиля *R* характеризуются наличием растительных включений.

Затопление профиля *Rb* происходит редко, только при высоком подъеме вод в период весеннего половодье и летне-осенних паводков. В составе проб данного профиля преобладает песчаная составляющая, верхняя часть значительно обогащена растительными включениями.

Интервал опробования составлял 3...5 см, вес проб варьировал от 0,3 до 0,5 кг. Пробы высушивались, подготавливались и отправлялись на анализ в лаборатории. Определение элементов проводилось методом инструментального нейтронно-активационного анализа на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т Томского политехнического университета (аналитики А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). Анализ радиоактивных изотопов проводился методами альфа- и гамма-спектрометрии в лаборатории рассеяния нейтронов, Институт Пауля Шеррера, Швейцария.

Подготовка пробы при определении радиоактивных изотопов заключалась в озолении (для исключения органической составляющей), выщелачивании азотной кислоты (для устранения нежелательных частиц (органических или нерастворимых)). Полученный раствор подвергался различным методам обработки в соответствии с радионуклидным анализом: хроматографии (Sr) или электроосаждения (Pu, Am). Отфильтрованные частицы помещались в альфа- ($^{238–239–240}$Pu, Am) или гамма- (^{134}Cs, ^{90}Sr, ^{60}Co) спектрометр, в котором производился подсчет количества распадов и вычислялась удельная активность образца. Активность изотопов плутония определялась в помещении высшего класса чистоты.

Результаты

Полученные с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. *Содержание некоторых лантаноидов, урана и тория в пойменных почвах протоки Чернильщиково, р. Томь, г/т*

Проба	Глубина, см	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	U	Th	Th/U
Rb-1	2,0	32,9	109,2	4,7	2,0	0,9	3,6	0,4	5,5	14,2	2,6
Rb-2	5,5	35,2	98,0	5,2	2,2	1,3	3,1	0,5	4,7	12,9	2,7
Rb-3	8,5	40,0	123,2	5,5	2,6	1,8	3,4	0,5	7,0	13,6	1,9
Rb-4	11,5	30,4	90,6	5,1	1,6	1,2	2,7	0,4	5,9	9,3	1,6
Rb-5	14,5	18,3	71,5	2,8	1,5	1,0	1,7	0,3	2,6	7,3	2,8
Rb-6	17,5	18,0	78,9	2,8	1,3	0,9	1,7	0,3	2,8	6,6	2,4
Среднее 6 проб	29,1	95,2	4,4	1,9	1,2	2,7	0,4	4,8	10,7	2,2	
Rb-7	20,5	17,2	72,0	2,6	1,1	0,7	1,6	0,2	2,6	6,3	2,4
Rb-8	23,5	19,6	75,5	3,0	1,1	1,0	1,5	0,2	1,6	6,0	3,8
Rb-9	26,5	20,9	80,1	3,0	1,3	1,0	1,7	0,2	1,6	6,9	4,3
Rb-10	29,5	17,4	61,8	2,4	1,3	0,7	1,8	0,2	2,0	6,0	3,0
Rb-11	32,5	16,3	75,5	2,5	1,3	0,7	1,5	0,2	1,9	6,4	3,4
Rb-12	35,5	21,6	85,4	2,7	1,5	0,9	2,0	0,2	2,1	6,5	3,1
Rb-13	38,5	19,9	76,5	3,3	1,8	1,1	2,0	0,3	0,5	7,8	15,6
Rb-14	41,5	18,3	75,8	2,7	1,4	0,9	2,0	0,3	1,9	7,8	4,1
Rb-15	44,5	19,0	75,8	2,7	1,4	1,1	1,9	0,2	2,3	7,3	3,2
Rb-16	47,5	22,7	78,5	3,5	1,3	1,0	2,4	0,3	3,3	8,7	2,6
Среднее *Rb*	23,0	83,0	3,4	1,5	1,0	2,2	0,3	3,0	8,4	3,7	
R-1	51,0	21,2	63,7	3,5	1,5	0,8	2,2	0,4	3,4	5,7	1,7
R-2	54,0	17,7	66,1	2,6	1,5	0,8	1,7	0,2	1,8	6,3	3,5
R-3	56,5	15,1	56,5	3,1	1,4	1,2	2,1	0,3	0,5	4,9	9,8
R-4	59,5	16,2	69,6	3,3	1,3	1,0	2,1	0,3	1,9	6,6	3,5
R-5	62,5	17,0	73,1	3,5	1,4	0,8	1,7	0,2	1,0	7,3	7,3
R-6	65,5	25,7	69,2	4,4	1,5	1,0	3,6	0,5	4,0	8,4	2,1
R-7	68,5	22,2	76,6	4,1	1,5	1,0	2,6	0,4	3,0	8,1	2,7
R-8	71,5	24,4	79,9	4,2	1,5	1,1	2,8	0,4	0,5	7,4	14,8
R-9	74,5	20,0	72,7	3,5	1,7	1,3	2,5	0,4	2,4	9,4	3,9
R-10	77,5	31,2	100,2	5,2	1,9	1,6	3,7	0,4	3,5	11,4	3,3
R-11	80,5	40,3	143,6	6,7	3,1	2,0	3,4	0,6	3,5	19,7	5,6
Среднее *R*	22,8	79,2	4,0	1,7	1,1	2,6	0,4	2,3	8,7	5,3	
Rc-1	83,0	21,5	96,3	4,6	1,8	1,0	1,6	0,2	2,5	5,9	2,4
Rc-2	86,5	35,8	105,3	5,5	2,3	1,5	3,4	0,5	4,4	11,6	2,6
Rc-3	91,5	33,7	101,4	5,6	1,9	1,4	3,7	0,5	3,0	11,4	3,8
Rc-4	96,5	35,2	113,4	5,9	2,6	1,7	4,1	0,5	3,3	14,5	4,4
Rc-5	101,5	36,1	117,2	5,9	3,0	1,5	3,5	0,5	2,6	14,6	5,6
Rc-6	106,5	34,4	120,2	6,0	2,6	1,8	3,5	0,5	3,2	13,7	4,3
Среднее *Rc*	32,8	109,0	5,6	2,4	1,5	3,3	0,5	3,2	12,0	3,8	
Среднее по разрезу	24,7	86,5	4,0	1,7	1,1	2,5	0,3	2,8	9,1	4,3	

Удельные активности радиоактивных изотопов семейства лантаноидов и трансурановых элементов, определенные в лаборатории рассеяния нейтронов (Институт Пауля Шеррера), приведены в табл. 2.

Уровни удельных активностей радиоизотопов в нижней части профиля *R* и профиле *Rc* имеют значения ниже предела обнаружения анализа.

Обсуждение результатов

Средние значения концентраций элементов каждого профиля (*Rb*, *R*, *Rc*) отличаются. Большинство элементов (Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Th) имеют тенденцию повышения уровней концентрации в ряду *Rb*-*R*-*Rc*. Наиболее высокие значения, характерные для профиля *Rc*, обусловлены тем, что кроме воздушного пути поступления элементов значительную роль в обогащении профиля имеет водный путь. Кроме того, содержание тонкодисперсной фракции глинистых минералов, играющей роль сорбента для многих элементов [11, 12], увеличивается с глубиной в вертикальном разрезе и обуславливает повышение концентраций элементов в профиле *Rc*, достигающих уровня профиля *Rb*, в который элементы поступают только аэрогенным путем.

Распределение лантаноидов, U, Th в вертикальном разрезе, объединяющим все три профиля, представлено на рис. 3. Отмечается сходное поведение лантаноидов, обусловленное близостью химических свойств элементов [11].

Повышенные содержания отмечаются в приповерхностном 15 см слое почвы, с пиком максимальных концентраций, фиксируемом на глубине 8,5 см, и довольно резком снижении значений на глубине 14...20 см. Увеличение значений концентрации лантаноидов также отмечается на глубине около 80 см.

Антропогенное аэрозольное влияние и наличие гумусового горизонта, выступающего в качестве геохимического барьера, являются основными факторами повышенных концентраций элементов в приповерхностном слое почвы.

Таблица 2. *Удельные активности (Бк/кг) воздушно-сухой пробы изотопов Eu, некоторых трансурановых элементов и их отношения в пойменной почве протоки Чернильщиково, р. Томь*

Проба	Глубина, см	^{152}Eu	^{154}Eu	^{241}Am	^{238}Pu	$^{239+240}$Pu	^{238}Pu/$^{239+240}$Pu
Rb-1	2,0	115±4	31±2	18±2	0,53±0,03	27,5±0,6	0,019
Rb-2	5,5	131±4	35±3	18±2	0,55±0,03	39,8±0,9	0,014
Rb-3	8,5	106±4	23±2	8,3±1,3	0,62±0,03	36,1±0,9	0,017
Rb-4	11,5	101±4	21±2	4,2±0,9	0,48±0,04	32,5±0,9	0,015
Rb-5	14,5	73±3	10±1	4,1±0,9	0,44±0,04	32,6±0,9	0,014
Rb-6	17,5	38±2	4±1	3,5±0,8	0,63±0,04	31,2±0,9	0,02
Rb-7	20,5	21±3	2±1	1,5±0,7	0,33±0,04	17,4±0,9	0,019
Rb-8	23,5	8±2	<2	0,7±0,4	0,11±0,02	5,5±0,3	0,021
Rb-9	26,5	<2	<2	<0,5	0,02±0,01	0,99±0,08	0,019
Rb-10	29,5	<2	<2	<0,5	0,02±0,01	1,11±0,08	0,017
Rb-11	32,5	<2	<2	<0,5	–	–	–
Rb-12	35,5	<2	<2	<0,5	0,01±0,01	0,86±0,05	0,011
Rb-13	38,5	<2	<2	<0,5	–	–	–
Rb-14	41,5	<2	<2	<0,5	0,01±0,01	0,75±0,05	0,013
Rb-15	44,5	<2	<2	<0,5	–	–	–
Rb-16	47,5	<2	<2	<0,5	–	–	–
R-1	51,0	–	–	–	–	–	–
R-2	54,0	–	–	–	<0,01	0,18±0,03	<0,05
R-3	56,5	–	–	–	<0,01	0,09±0,02	<0,05
R-4	59,5	–	–	–	<0,01	0,04±0,02	<0,05

Значения удельных активностей ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{238}Pu с учетом периода полураспада пересчитаны на 2011 г., ^{241}Am, $^{239+240}$Pu приведены без пересчета (2004 г.).

В нижней части разреза пик повышенных концентраций может быть обусловлен дополнительным поступлением элементов водным путем, а также сменой состава почв на границе разрезов *R-Rc*.

С целью оценки уровня загрязнения изучаемых проб проведено сравнение средних значений концентраций элементов в вертикальном разрезе с данными, характеризующими земную кору, почвы, ноосферу, подзолистые почвы Томской области, табл. 3.

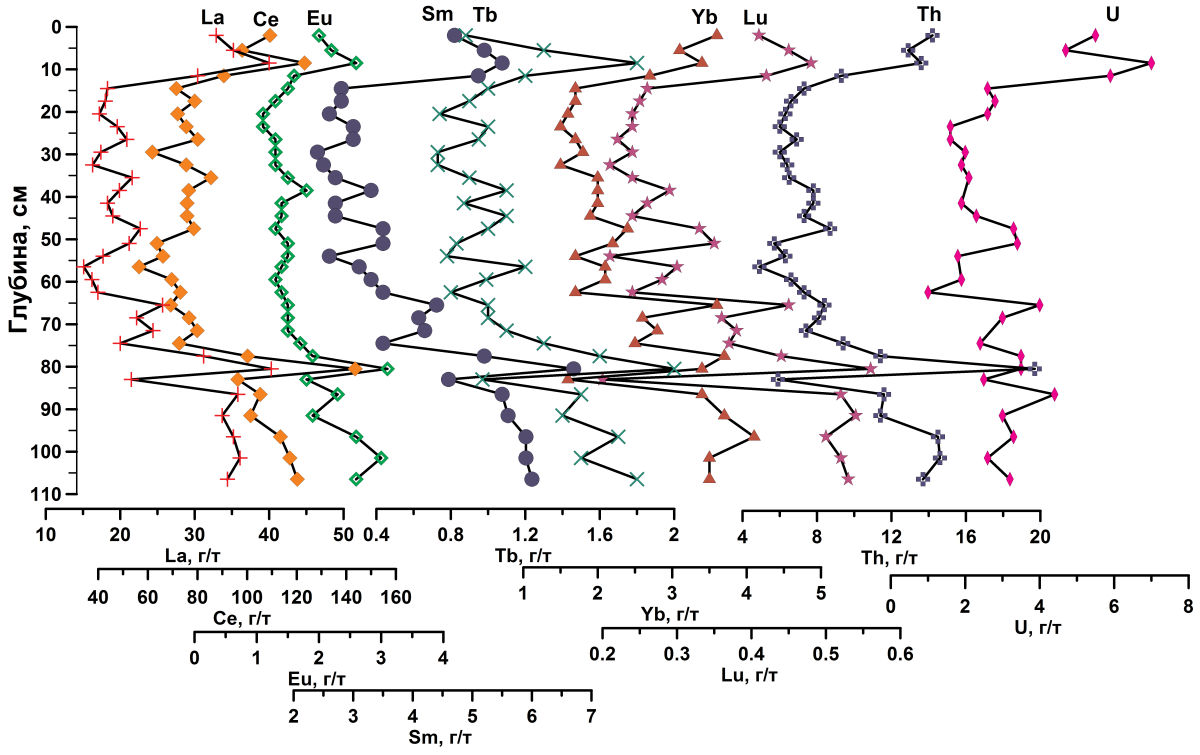


Рис. 3. *Распределение лантаноидов и актиноидов в почвенном разрезе*

Таблица 3. *Среднее содержание лантаноидов, урана и тория в различных геологических образованиях, ноосфере и исследуемых почвах, г/т*

Геологическая среда	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Th	U	Th/U	Источник
Земная кора	29,0	70,0	8,0	1,3	4,3	0,3	0,8	13,0	2,5	5,2	[13]
Подзолистые почвы	17,3	33,4	3,9	1,4	0,1	0,9	0,2	3,7	0,5	7,4	[14]
Почвы СССР	29,0	56,0	6,5	0,6	0,6	0,6	0,6	7,8	2,0	3,9	[15]
Кларк ноосферы	12,0	32,0	4,5	0,6	0,6	1,9	0,5	7,6	1,9	4,0	[16]
Изучаемый разрез (среднее значение)	24,7	86,5	4,0	1,7	1,1	2,5	0,3	2,8	9,1	4,3	Данные табл. 1

Исследуемые почвы имеют повышенные концентрации лантаноидов в сравнении со значениями, характеризующими подзолистые почвы, принимаемые за фоновые значения Томской области. Содержание Ce, Eu, Yb в изучаемых почвах превышает их концентрацию в земной коре. Отмечаются повышенные концентрации Ce, Eu, Tb, Yb, Lu в исследуемых почвах в сравнении со значениями, выявленными в почвах СССР. Сравнивая содержания элементов в изучаемом разрезе с содержаниями в ноосфере, отмечаем повышенные концентрации в изучаемом разрезе следующих элементов: La, Ce, Eu, Tb, Yb.

Таким образом, уровни концентраций многих элементов изучаемого разреза имеют повышенные значения в сравнении с другими природными средами, что может быть обусловлено влиянием антропогенного фактора.

Наряду с лантаноидами, в пойменных почвах были выявлены элементы группы актиноидов: уран и торий (табл. 1, рис. 3). Как известно, семейство лантаноидов (4*f*-элементов) является химическим аналогом семейства актиноидов (5*f*-элементов), что обуславливает сходное поведение и распределение данных групп элементов.

В вертикальном разрезе отмечается уменьшение средних значений тория в ряду *Rc-R-Rb*, в то время как для урана характерна следующая последовательность: *Rb-Rc-R*. Вертикальное распределение тория сходно с распределением лантаноидов и характеризуется повышенными концентрациями в приповерхностном 14,5 см слое профиля *Rb* и общей тенденцией увеличения содержаний с увеличением глубины для всего вертикального разреза за исключением верхних 14,5 см.

Распределение урана имеет сходство с распределением тория и лантаноидов, проявляющееся в обогащении приповерхностного 11,5 см слоя почвы. С увеличением глубины разреза явно выраженных общих закономерностей распределения урана, лантаноидов и тория не наблюдается, кроме того в одной пробе профиля *Rb* и двух пробах профиля *R* концентрации урана находятся ниже предела обнаружения анализа.

Причинами отличий вертикального распределения урана от лантаноидов и тория могут быть химические свойства и характер поступления урана в изучаемые объекты.

Сопоставим уровни концентраций урана и тория в исследуемых пробах с другими почвами. Содержание урана в почвах СССР оценивается на уровне 2 г/т, тория 7,8 г/т [15], в почве заказника «Томского», принимаемого за фон, 0,5 и 3,7 г/т [14], соответственно. Средние значения, характеризующие Томскую область, по урану оцениваются 2,5; торию 10,8 г/т [17]. Полученные в результате исследований данные в целом по вертикальному разрезу для урана составляют 2,8 г/т, тория 9,1 г/т.

Таким образом, содержание урана и тория в исследуемых пробах характеризуется повышенными значениями, особенно по отношению к уровням концентраций, принимаемым за фоновые значения, что может быть обусловлено влиянием антропогенного источника.

Для выявления источника загрязнения в качестве индикатора довольно часто используется торий-урановое соотношение (Th/U), значение которого для большинства генетических типов почв изменяется в интервале 2,5...5. Значение отношений Th/U ниже 2,5 (урановая природа) характеризует почвы, подвергшиеся воздействию предприятий ЯТЦ [17].

В табл. 3 приведены значения торий-урановых соотношений, характеризующие различные геологические среды. Изменение значений Th/U фиксируется в диапазоне 3,9...7,4.

Среднее значение отношения Th/U изучаемых почв составляет 4,3, в профилях варьируя от 3,7 до 5,3. В приповерхностной части почвы (верхние 6 проб) Th/U соотношение имеет значение 2,2, что указывает на воздействие предприятия ЯТЦ и согласуется с ранее проведенными исследованиями [17].

Деятельность Сибирского химического комбината, связанная с использованием, переработкой, получением радиоактивных материалов, обуславливает специфику загрязняющих веществ. В пробах, отобранных на территориях, прилегающих к подобного рода предприятиям (ПО «Маяк», Челябинская область; Горный химический комбинат, Красноярск), фиксируется загрязнение радиоактивными изотопами, которые образуются в результате осколочного деления, ядерных реакций присоединения, активации [3, 7, 8, 18].

В изучаемых почвах выявлены элементы техногенного происхождения (табл. 2). Европиевые изотопы (^{152}Eu с периодом полураспада $T_{1/2}$=13,3 л, Eu^{154} ($T_{1/2}$=8,6 л)) образуются в результате деления ядер ^{238}U под воздействием тепловых нейтронов, тогда как трансурановые элементы ^{241}Am ($T_{1/2}$=430 л), ^{238}Pu ($T_{1/2}$=87,7 л), $^{239+240}$Pu (Pu^{239} $T_{1/2}=2{,}41\cdot10^4$ л, Pu^{240} $T_{1/2}$=6737 л) – в результате поглощения нейтронов.

Изотопы ^{152}Eu и ^{154}Eu были обнаружены в почвенном разрезе только в профиле *Rb*, и их присутствие в концентрациях выше предела обнаружения анализа установлено до глубины ~26 см. Характер

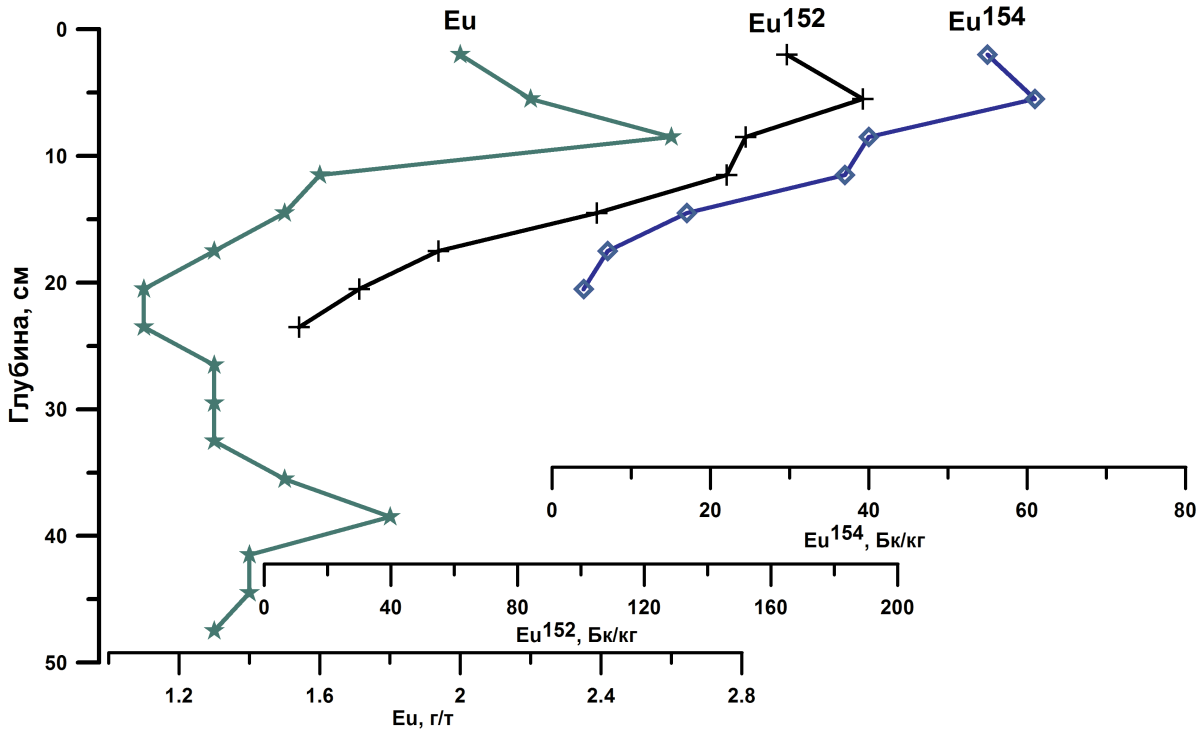


Рис. 4. *Распределение изотопов Eu в вертикальном разрезе пойменных почв*

вертикального распределения радиоактивных изотопов европия идентичен, рис. 4. Отмечается уменьшение удельной активности изотопов с увеличением глубины разреза, за исключением верхних ~5 см, где наблюдается обратная зависимость. Максимальные уровни удельных активностей ^{152}Eu, ^{154}Eu приурочены к приповерхностному слою почвы (2...5,5 см) и составляют 131 и 35 Бк/кг, соответственно.

Наряду с короткоживущими изотопами Eu был выявлен изотоп ^{134}Cs ($T_{1/2}$=2,1 л) [5].

Поведение и распределение техногенных радиоактивных изотопов Eu в вертикальном разрезе сходно с поведением общей суммы Eu, включая его нерадиоактивные аналоги (рис. 4). Отмечается тенденция увеличения значений с увеличением глубины в верхней части разреза (^{152}Eu, ^{154}Eu (0...5,5 см), для общей суммы Eu (0...8,5 см)) и уменьшения значений с увеличением глубины в интервале глубин 8,5...26 см.

Пики максимальных значений радиоактивных изотопов и суммы всех изотопов Eu, включая нерадиоактивные аналоги, не совпадают. Причинами несовпадения пиков может являться отличие форм поступления радиоактивных изотопов от нерадиоактивных аналогов в уже сформировавшейся почве, а также характер поведения изотопов в почве, особенно в первые годы после поступления. Лишь со временем формы нахождения радионуклидов могут меняться, и они начнут включаться в миграционные циклы, характерные для их изотопных носителей [19].

Высокие удельные активности короткоживущих радиоизотопов европия и цезия могут свидетельствовать о загрязнении территории в недалеком прошлом, либо о значительном загрязнении в более отдаленном времени и указывают на влияние локального источника. Глобальные выпадения короткоживущих изотопов, с учетом периода полураспада, к настоящему времени либо не должны быть обнаружены, либо должны иметь незначительные удельные активности.

Высокие значения удельных активностей техногенных трансурановых элементов ^{241}Am, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, выявленные в изучаемых пробах, указывают на выраженное антропогенное воздействие на изучаемую территорию.

Радиоактивный изотоп ^{241}Am был обнаружен в профиле *Rb* и прослеживался до глубины 25 см. Вертикальное распределение ^{241}Am характеризуется уменьшением значений удельной активности с увеличением глубины разреза. Максимальные значения приурочены к приповерхностному слою почвы (8,5 см) и достигают величины 18 Бк/кг.

Количество ^{241}Am может увеличиваться с течением времени, так как кроме наработки в ядерных реакциях присоединения он может образовываться в результате распада короткоживущего ^{241}Pu ($T_{1/2}$=15 л). В связи с этим актуальность изучения и экологическая опасность ^{241}Am будет оставаться высокой на протяжении долгого времени, учитывая то, что период его полураспада составляет 430 лет.

Изотопы плутония были выявлены в профилях *Rb*, *R* и фиксировались в вертикальном разрезе до глубины 41,5 (^{238}Pu) и 59,6 см ($^{239+240}$Pu).

Распределение ^{238}Pu и $^{239+240}$Pu имеет схожий характер. Отмечаются повышенные удельные актив-

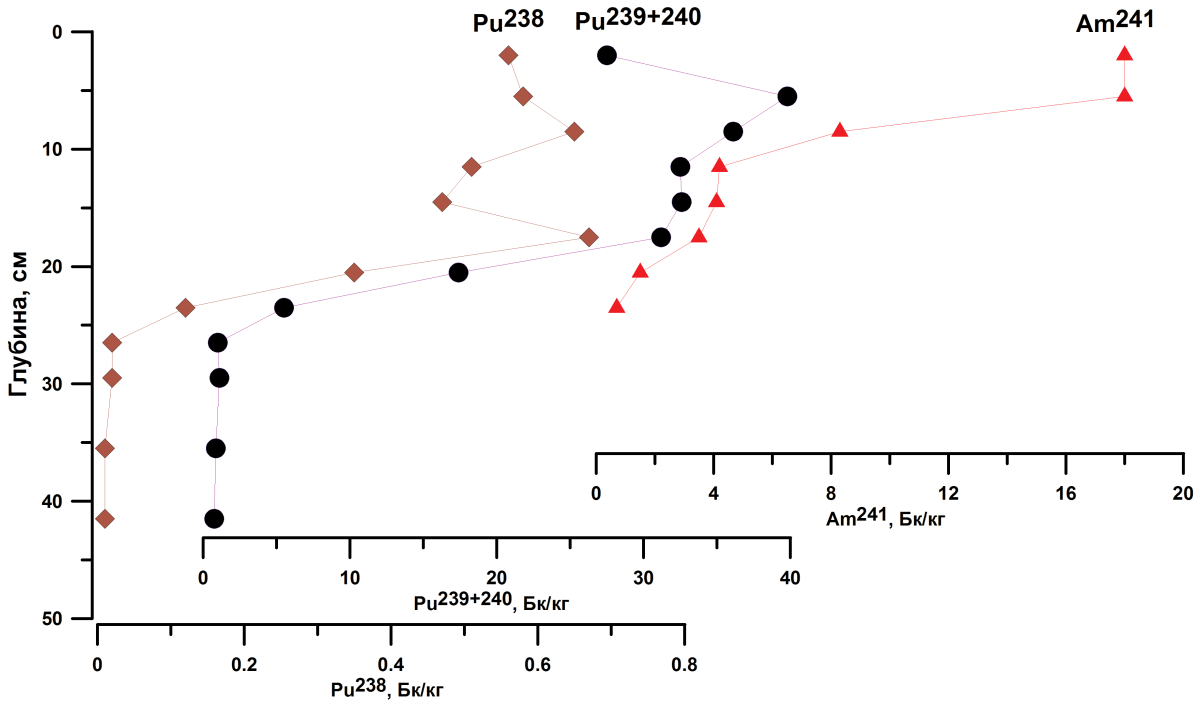


Рис. 5. *Распределение трансурановых элементов в вертикальном разрезе пойменных почв*

ности в верхнем 22 см слое, с довольно резким последующим снижением значений при увеличении глубины разреза.

Отличие характеров вертикального распределения ^{238}Pu и $^{239+240}$Pu в интервале 0...22 см может быть обусловлено проявлением различных геохимических свойств изотопами плутония в природных средах, а также характером и периодичностью поступления данных изотопов от техногенного источника.

Для оценки уровня загрязнения плутонием сравним полученные значения удельных активностей ^{238}Pu и $^{239+240}$Pu с данными, характеризующими «глобальные выпадения», и со значениями, характерными для территорий, загрязненных в результате функционирования и аварий предприятий ЯТЦ (табл. 4).

Уровни загрязнения изотопами плутония, характеризующие «глобальные выпадения», в основном связаны с испытаниями ядерного оружия в атмосфере и фиксируются по всему земному шару. Отмечается зависимость уровня «глобальных выпадений» от широты, особенно в северном полушарии.

Для изучаемой территории исследования по выявлению значений, характеризующих «глобальные выпадения», не проводились, поэтому используем данные, характеризующие 50...60° с.ш. территории европейских стран с установленными значениями: ^{238}Pu=0,044±0,004 мКи/км^2, $^{239+240}$Pu=1,3±0,2 мКи/км^2 (1970 г.) [3, 6]. Производим пересчет единиц измерения мКи/км^2 в Бк/м^2 и для ^{238}Pu с периодом полураспада 87,7 лет корректируем значение на 2011 г. Таким образом, уровни удельных активностей составляют: ^{238}Pu=1,2 Бк/м^2, $^{239+240}$Pu=48,1 Бк/м^2.

Уровни загрязнения изотопами плутония, фиксируемые на территориях, подвергшихся влиянию предприятий ЯТЦ, характеризуются повышенными значениями в сравнении со значениями, характерными для «глобальных выпадений». В 30-ти километровой зоне таких предприятий, как ПО «Маяк» (Челябинская область), Горный химический комбинат (ГХК) (Красноярский край) и Сибирский химический комбинат (изучаемые пробы) фиксируются значения удельных активностей изотопов плутония, превышающих глобальные выпадения в несколько раз (табл. 4).

По уровню загрязнения плутониевыми изотопами на территории Красноярского края выделяется три группы почв:

а) почвы с фоновым глобальным загрязнением, свободным от влияния ГХК (диапазон варьирования удельной активности плутония составляет от 0,1 до 2 Бк/кг, при среднем значении 0,34±0,32 Бк/кг);

б) почвы 20 км зоны ГХК, дополнительно загрязненные плутонием газоаэрозольных выбросов комбината (диапазон варьирования от 0,1 до 11 Бк/кг, среднее значение 0,69±1,28 Бк/кг);

в) пойменные почвы р. Енисей на участке реки протяженностью 1500 км ниже по течению от г. Железногорска, Красноярский край, загрязненные плутонием, содержащимся в жидких сбросах ГХК (диапазон варьирования от 0,1 до 50 Бк/кг, среднее значение 5,60±8,22 Бк/кг) [21].

Исследуемые нами пробы характеризуются значениями, сопоставимыми со значениями, характерными для пойменных почв р. Енисей, которые подверглись загрязнению в результате функциони-

рования ГХК, а также значениям, характеризующими почвы территории, подвергшиеся влиянию деятельности ПО «Маяк» (табл. 4).

Таблица 4. *Уровни удельных активностей изотопов плутония (Бк/м²) и их отношения в почвах различны регионов*

Источники загрязнения	^{238}Pu	$^{239+240}$Pu	^{238}Pu/$^{239+240}$Pu	Источник
Глобальные выпадения	1,20	48,10	0,025	[3]
Близлежащие территории предприятий ядерно-топливного цикла				
ПО Маяк (Башакуль, в 27 км) Челябинская область	25,00	710,00	0,030	[8]
Горный химический комбинат, средние значения о. Городской (дальняя зона)	7,41*	443,30*	0,020	[7]
Изучаемый разрез	4,07*	245,17*	0,017	–
Территории, загрязненные в результате аварии на Чернобыльской АЭС				
Белоруссия	25,40	48,10	0,530	[21]
Польша	1,20	3,20	0,370	[22]

**Для перевода значений Бк/кг в Бк/м² использовали значение плотности почв 1300 кг/м³.*

Для выявления источников загрязнения плутонием в качестве индикатора как российскими, так и зарубежными авторами используются значения ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu соотношения [4, 7, 18, 20, 21]. Применение данного индикатора основано на сопоставлении величин плутониевых соотношений, характеризующих разные источники. Так глобальные выпадения 50...60° с.ш. характеризуются значением плутониевого соотношения 0,034 (1970 г.) [3], что с коррекцией на 2011 г. составляет 0,025. Территории, подвергшиеся влиянию локальных источников, характеризуются смещением значений изотопных отношений в одну или другую сторону по отношению к величине, характеризующей глобальные выпадения. Воздействие предприятий, занимающихся производством оружейного плутония, сдвигает значение изотопного соотношения в сторону уменьшения [7, 20], тогда как газоаэрозольные выбросы атомных электростанций и выбросы при нештатных ситуациях – в сторону увеличения [21, 22].

Изучаемые пробы характеризуются пониженным изотопным ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu соотношением (табл. 4) в сравнении с глобальными выпадениями, что указывает на дополнительную эмиссию изотопов $^{239+240}$Pu от локального источника, которым является Сибирский химический комбинат.

Выводы

В результате изучения пойменных почв протоки Чернильщиково р. Томи установлены уровни накопления и характер вертикального распределения лантаноидов (La, Ce, Sm, Eu, ^{152}Eu, ^{154}Eu, Tb, Yb, Lu) и актиноидов (U, Th, ^{241}Am, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu).

В вертикальном разрезе участки повышенных концентраций лантаноидов отмечаются в приповерхностном слое почвы и на глубине около 80 см. Характер распределения тория аналогичен распределению лантаноидов. Вертикальное распределение урана характеризуется повышенными концентрациями, приуроченными к приповерхностному слою.

Уровни накопления многих изучаемых элементов группы лантаноидов превосходят значения, характерные для других почв. Причинами повышенных концентраций лантаноидов в верхней части разреза, вероятнее всего, является влияние антропогенного источника, в то время как обогащение нижней части разреза связано с его интенсивным периодическим затоплением и повышенным содержанием глинистой составляющей.

Удельные активности трансурановых элементов (^{241}Am, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu) значительно превышают уровень «глобальных выпадений» и сравнимы со значениями, характеризующими территории, подвергшиеся радиоактивному загрязнению в результате деятельности предприятий ядерно-топливного цикла.

Высокие удельные активности короткоживущих радиоактивных изотопов ^{152}Eu и ^{154}Eu, фиксируемые в верхней части разреза, указывают на локальный источник, которым, вероятней всего, является Сибирский химический комбинат.

Вертикальное распределение радиоактивных изотопов (Am^{241}, Pu^{238}, $Pu^{239+240}$, ^{152}Eu, ^{154}Eu) характеризуется повышенными значениями, отмечающимися в приповерхностной части вертикального разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aubert D., Stille P. Characterization and migration of atmospheric REE in soils and surface waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2002. – V. 66. – № 19. – P. 3339–3350.
2. Рихванов Л.П. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения. – Томск: Изд-во Серкова Т.И., 2006. – 216 с.
3. Perkins R.W., Thomas C.W. Worldwide fallout. In Transuranic elements in the Environment: Tech. Inf. Center US Department of Energy: DOE/TIC-22880 / ed. W.C. Hanson. – Washington, D.C., 1980. – P. 53–82.
4. Dufa C., Renaud P. ^{238}Pu and $^{239+240}$Pu inventory and distribution through the lower Rhone valley terrestrial environment (Southern France) // Science of the Total Environment. – 2005. – V. 348. – P. 164–172.
5. Gauthier-Lafaye F., Pourcelot L., Eikenberg J., Beer H., Le Roux G., Rikhvanov L.P., Stille P., Renaud Ph., Mezhibor A. Radioisotope contaminations from releases of the Tomsk-Seversk nuclear facility (Siberia, Russia) // Journal of Environmental Radioactivity. – 2008. – V. 99. – № 4. – P. 680–693.
6. Hardy E.P., Krey P.W., Volchok H.L. Global inventory and distribution of fallout plutonium // Nature. – 1973. – V. 241. – P. 444–445.
7. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. – Новосибирск: СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 286 с.

8. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В., Любашевский Н.М. Особенности радиационной обстановки на Урале. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 151 с.
9. Рихванов Л.П., Нарзулаев С.Б., Язиков Е.Г. и др. Геохимия почв и здоровье детей Томска. – Томск: Изд-во ТПУ, 1993. – 142 с.
10. Коробова Н.Л. Экология почв. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского ГТУ, 2000. – 168 с.
11. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 360 с.
12. Титаева Н.А. Геохимия природных радиоактивных рядов распада. – М.: ГЕОС, 2005. – 226 с.
13. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.
14. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 47 с.
15. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: В 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. – М.: Экология, 1997. – Кн. 6: Редкие f-элементы. – 607 с.
16. Глазовская М.А. Касимов Н.С. Теплицкая Т.А. Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. – М.: Наука, 1989. – 264 с.
17. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
18. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии. – Томск: STT, 2009. – 430 с.
19. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
20. Атурова В.П. Плутоний в почвах Красноярского края: дис. ... канд. биол. наук. – Красноярск, 2001. – 145 с.
21. Michel H., Gasparro J., Barci-Funel G., Dalmasso J., Ardisson G., Sharovarov G. Radioanalytical determination of actinides and fission products in Belarus soils // Talanta – 1999. – V. 48. – P. 821–825.
22. Mietelski J.W., Bogdan W. Plutonium from Chernobyl in Poland // Appl. Radiat. Isot. – 1995. – V. 46. – № 11. – P. 1203–1211.

Поступила 11.04.2011 г.

УДК 621.039.7

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ НИЗКО- и СРЕДНЕРАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ ЗАЩИТЫ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПАУНДОВ ОТ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ

О.А. Горбунова, С.Е. Винокуров

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва
E-mail: olg-gorbunova@yandex.ru

Впервые установлено, что применение биоцидного полимера класса полигексаметиленгуанидинов в технологиях цементирования жидких и твердых радиоактивных отходов низкой и средней активности позволяет не только предотвратить микробиологическую деструкцию цементных компаундов при длительном хранении в приповерхностных хранилищах, но и улучшить ряд важных технологических параметров процесса цементирования, повысить прочностные свойства конечного продукта, увеличить степень наполнения по отходам конечных компаундов и расширить ассортимент радиоактивных отходов, принимаемых на цементирование.

Ключевые слова:
Радиоактивные отходы, цементирование, микробиологическая деструкция, биоцидные добавки, полигексаметиленгуанидин, суспензирование, пропитка, цементный компаунд, микроструктура, прочность на сжатие.

Key words:
Radioactive waste, cementation process, microbial corrosion, biocide additive, polyhexamethyleneguanidine, slurryfication, impregnation, cement compound, microstructure, compression strength.

Наиболее распространенным способом кондиционирования радиоактивных отходов (РАО) низкой и средней активности (НАО и САО) является цементирование, позволяющее получать с небольшими капитальными и эксплуатационными затратами негорючий конечный продукт, удовлетворяющий нормативным требованиям ГОСТ Р 51883-2002 [1]. В настоящее время контроль качества цементированных НАО и САО не учитывает микробиологическую деструкцию цементной матрицы. Однако потенциальные субстраты для развития микробиоты в составе отходов при долговременном хранении в условиях хранилищ делают возможным биогенное нарушение микроструктуры цементной матрицы (появление микропор, трещин, полостей). Это ухудшает иммобилизационные свойства цементной матрицы (прочность на сжатие, морозостойкость, стойкость фиксации радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr) и снижает безопасность долговременного хранения.

Целью работы является повышение надежности и безопасности долговременного хранения кондиционированных НАО и САО за счет разработки и внедрения научно обоснованных технических решений по защите цементных компаундов от микробиологической деструкции.

Проведенными в ГУП МосНПО «Радон» многолетними экспериментальными исследованиями [2–4] впервые доказано, что при длительном хранении в условиях приповерхностных хранилищ кондиционированных РАО (средняя температура в за-

висимости от сезона +(6...15) °С, влажность, затрудненный воздухообмен, отсутствие света) цементные компаунды с РАО населяют ассоциации микроорганизмов, способных использовать в качестве питательной среды компоненты РАО (целлюлозосодержащие фрагменты деревянной тары, ветоши, средств индивидуальной защиты, концентраты солей, минеральные масла, органические растворители). В процессе жизнедеятельности такие микроорганизмы выделяют газы, альдегиды, кислоты, снижающие иммобилизационные характеристики цементной матрицы за счет образования пор и микротрещин. Для предотвращения негативного воздействия микробиологического фактора при участии авторов разработаны [5, 6] комплексные цементные материалы, содержащие биоцидные добавки класса полигексаметиленгуанидинов (ПГМГ) [7], отличающиеся от ряда других эффективных биоцидов не только малыми подавляющими концентрациями и удобством дозирования, но и обнаруженным нами положительным влиянием на технологические параметры процессов цементирования.

Цементирование ЖРО с высокой степенью наполнения по отходам

Нами впервые обнаружено, что в присутствии 0,5...3 мас. % ПГМГ у цементных растворов на основе водных солевых жидких радиоактивных отходов (ЖРО), содержащих нитраты – питательную среду для развития денитрифицирующих бактерий, наблюдается отсутствие водоотделения при затвердевании компаунда и значительное увеличение прочности на сжатие. Таким образом, полимер ПГМГ не только является биоцидной добавкой, предотвращающей образование денитрифицирующими бактериями биогенных кислот и газов, но и позволяет при сохранении требуемых прочностных характеристик (5 МПа на 28 сутки твердения) готовить более жидкий цементный раствор с высоким растворцементным (Р/Ц) отношением Р/Ц=*m* (ЖРО)/*m* (цемент+добавки)=0,75...1,2, где *m* – масса, г. Благодаря упрочняющему действию ПГМГ возможно включать в конечный компаунд б**о**льшее количество ЖРО, сокращая за счет этого объем конечного компаунда, подлежащего длительному хранению (табл. 1).

Таблица 1. *Влияние полимера ПГМГ на параметры цементирования водных солевых нитратсодержащих ЖРО (солесодержание 100 г/л)*

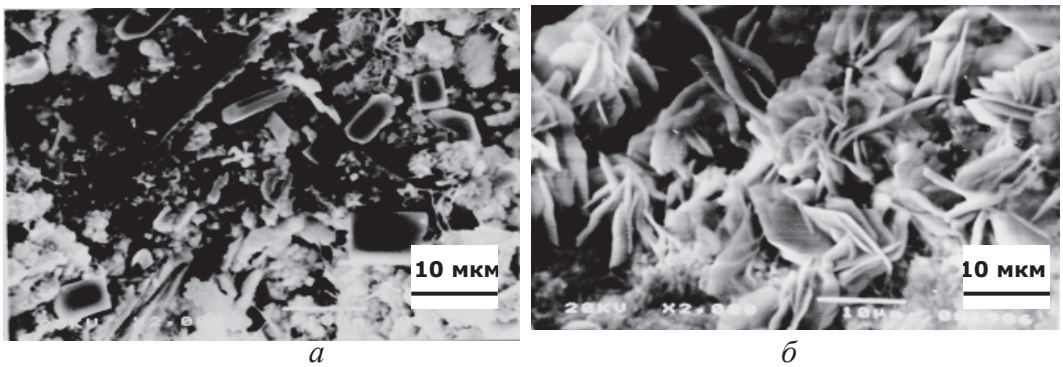
Р/Ц	Биоцид ПГМГ, мас. %	Сроки схватывания, ч	Водоотделение, об. %	Прочность на сжатие на 28 сут, МПа	Доля включенных отходов, мас. %	Снижение объема конечного компаунда*
0,75	–	3...12	5...7	14,3	42,88	–
	0,5...1,0	0,5...2	0...0,2	28,7		
0,85	0,5...1,0	0,5...2	0,1...0,3	19,8	45,95	–
	1,0...3,0	0,25...1	0...0,01	29,7		на 9 %
1,0	–	5...15	8...10	5,0	50,00	–
	0,5...3,0	3...4	0...0,3	9,8		на 15 %
1,2	–	5...15	18...23	–**	54,55	–
	0,5...3,0	4...6	0,5...1	7,6		на 20 %

**В сравнении с традиционным при Р/Ц=0,75, портландцемент марки М400 без добавок.*

***Не измеряли, т. к. из-за большого водоотделения образцы дали большую усадку, изменилось Р/Ц.*

Причины повышения прочности цементных компаундов в присутствии ПГМГ установлены нами по совокупности результатов рентгенофазового (РФА), петрографического и электронно-микроскопического (СЭМ) анализа.

Нами впервые установлено, что полимер ПГМГ влияет на характер гидратации алюминатов кальция в составе цементной матрицы. Так, в отсутствие ПГМГ на ранних сроках твердения (3–28 сутки) фазовый состав цементной матрицы характеризуется преобладанием кубических кристаллов шестиводного трехкальциевого гидроалюмината $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6H_2O$ (C_3AH_6) с ровной гладкой поверхностью (рис. 1, *а*). С увеличением срока гидратации структура материала продолжает характеризоваться неоднородностью в кристаллизации гидроалюминатов кальция (CAH_{10} и C_2AH_8). В присутствии ПГМГ, наоборот, кристаллизуется только гексагональный десятиводный однокальциевый гидроалюминат кальция $CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}10H_2O$ (CAH_{10}) (появляются рефлексы на дифрактограммах РФА *d*, Å: 8,080, 4,750, 3,675), и не образуется кубический шестиводный гидроалюминат кальция C_3AH_6 (отсутствуют пики *d*, Å: 5,140, 3,370, 2,820, 2,300).



а *б*

Рис. 1. *Характер кристаллизации гидроалюминатов кальция в цементных компаундах на основе водных солевых нитратсодержащих ЖРО на 28 сутки твердения: а) C_3AH_6, неоднородная структура; б) CAH_{10}, сетчатый каркас*

Отсутствие кристаллизации кубического C_3AH_6 при включении в состав компаунда полимера ПГМГ и появление гексагональных пластин CAH_{10} подтверждается микрофотографиями СЭМ (рис. 1, *б*) и петрографическими исследованиями, показывающими, что в присутствии ПГМГ за счет прорастания между образованиями гидросиликата кальция пластинчатых зерен гидроалюмината кальция CAH_{10} микроструктуры цементной матрицы образуется сетчатым каркасом, что принципиально отличает микроструктуру образцов с добавкой. Для образцов с ПГМГ отмечена также б**о**льшая доля волокнистых кристаллов, которые вкупе с сетчатым каркасом из пластин CAH_{10} «сшивают», самоармируют структуру цементной матрицы. С увеличением возраста твердения каркасная структура, образующаяся в присутствии полимера ПГМГ становится более плотной, значительно увеличивая прочность на сжатие цементных компаундов.

Цементирование радиоактивных масел с предварительным суспензированием

Эффект упрочнения цементной матрицы с помощью полимера ПГМГ оказывается полезен при цементировании загрязненных радионуклидами гидрофобных минеральных масел и органических жидкостей. Подобные органические материалы в составе цементного компаунда требуют биоцидной защиты с помощью ПГМГ, так как выступают субстратами для поселения и развития бродильных микроорганизмов, выделяющих кислоты и углекислый газ. Кроме того, масла и органические растворители негативно влияют на твердение и набор прочности за счет обволакивания минералов цемента гидрофобной пленкой (рис. 2), препятствуя доступу воды для реакций гидратации и замедляя схватывание и твердение цементных компаундов. Отслаивание масла при перемешивании цементного раствора также создает технологические трудности в процессе цементирования ЖРО.

Биоцидное и упрочняющее действие полимера ПГМГ позволило включить данный полимер в состав комплексного цементного материала «БИЗОН-БПл» [8] и специального портландцемента с комплексными добавками «СПЦК» [9], разработанных с участием специалистов ГУП МосНПО «Радон». С применением данных цементных материалов разработаны и внедрены технология и опытно-промышленный модуль (рис. 3) цементирования масел и органических жидкостей [10].

Для повышения равномерности распределения масла готовится предварительная суспензия из радиоактивного масла и водных ЖРО с добавкой «БИЗОН-БПл» или «СПЦК», содержащих: бентонит, способный сорбировать масло, следовательно, уменьшать его содержание в жидкой фазе, а также сорбировать радионуклиды ^{137}Cs; ультратонкомолотый высокомарочный быстротвердеющий цемент, который улучшает прочностные свойства конечного цементного компаунда; биоцидную и упрочняющую добавку ПГМГ, обеспечивающую микробиологическую защиту компаунда и способствую-

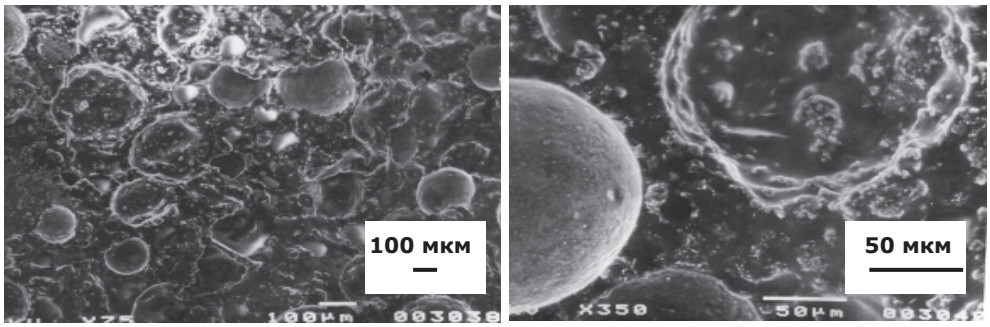


Рис. 2. *Микроструктура цементных компаундов, содержащих 15 мас. % масла без добавок*

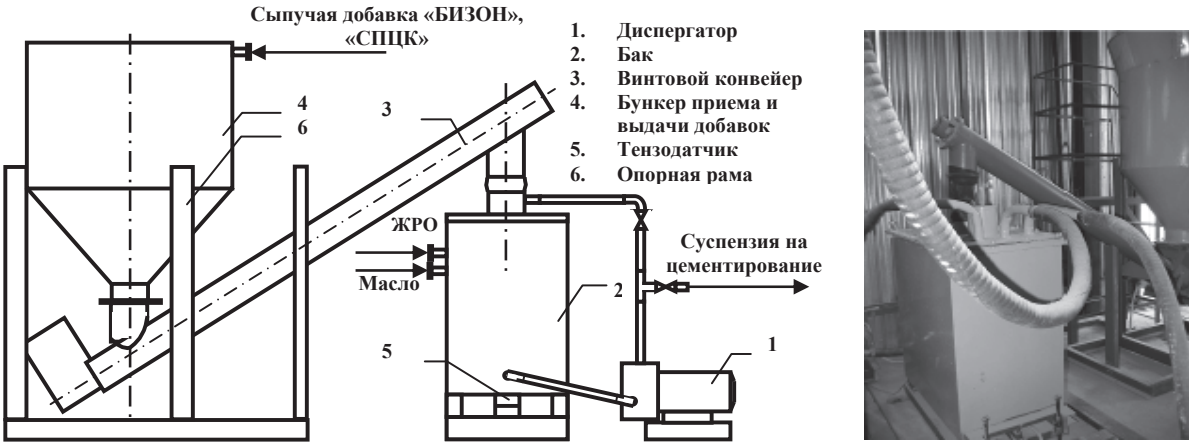


Рис. 3. *Опытно-промышленный модуль для подготовки радиоактивного масла к цементированию*

***Таблица 2**. Свойства цементных компаундов с радиоактивным маслом, приготовленных со специальными цементными материалами*

Состав цементного раствора (Р/Ц=0,7)	Свойства цементного раствора			Прочность на сжатие конечного компаунда, МПа		
Масло мас. %	Основной цементный материал + цементный материал в суспензии	Растекаемость мм	Отслоение масла, об. %	28 сут.	После 30 циклов заморажив. – оттаивания	После 90 сут. в воде
5	Цемент+30 % СПЦК	>240	0	6,0	5,1	5,9
	70 % СПЦК+30 % СПЦК	213	0	7,5	7,0	7,0
10	Цемент+30 % СПЦК	195	0	5,7	4,9	5,0
	70 %СПЦК+30 % СПЦК	113	0	7,0	6,6	6,8
15	Цемент+30 % СПЦК	190	0,2	3,8	0,9	2,8
	70 % СПЦК+30 % СПЦК	112	0	5,3	5,0	5,1

щую уплотнению микроструктуры цементной матрицы.

Суспензия тщательно взбивается в баке с помощью диспергатора, создающего за счет фланцевавихрителей турбулентный поток и пульсацию. Подготовленное радиоактивное масло в виде однородной устойчивой суспензии подается на установку цементирования в основной смеситель. Совместное цементирование водных солевых нитратсодержащих ЖРО и радиоактивного масла ведется при следующих параметрах: Р/Ц=0,7; включение радиоактивного масла – 5...15 мас. %; количество добавки «БИЗОН» или «СПЦК», вводимое в предварительную суспензию – 30 % от общей массы цементного материала; время приготовления предварительной суспензии 3...5 мин. Свойства цементных растворов и конечных компаундов, приготовленных по данной технологии, представлены в табл. 2.

Установлено, что при высоком наполнении цементного компаунда радиоактивными отходами (до 15 мас. % масла) удовлетворительных результатов (5,3 МПа) удается добиться только при приготовлении предварительной суспензии с полной заменой портландцемента на «СПЦК» или «БИЗОН-БПл».

Цементирование твердых радиоактивных отходов пропиткой

Авторами впервые установлено [11], что в присутствии биоцида ПГМГ снижается водоотделение цементного раствора и его проникающая способность, что позволяет использовать его в качестве важного компонента высокопроникающих цементных растворов при цементировании твердых радиоактивных отходов (ТРО) методом пропитки.

На цементирование поступают различные виды ТРО, в том числе, из-за недостатка сортировки, фрагменты горючих РАО (деревянная тара, средства индивидуальной защиты, ветошь и т. п.) в количестве до 2...5 мас. %. Целлюлозосодержащие материалы, некоторые виды пластиката, гидролизуясь под действием щелочной реакции цементного раствора, могут выступать субстратом для поселения и развития бродильных, денитрифицирующих, нитрифицирующих, сульфатредуцирующих микроорганизмов, поэтому нуждаются в биоцидной защите при длительном хранении. ТРО, поступающие на цементирование, разнообразны по размерам – от крупнокусковых фрагментов размером 1...60 см снятого с эксплуатации оборудования, до насыпных мелкодисперсных грунтов или зольного остатка от сжигания РАО с размером частиц 5...150 мм.

Разработанный авторами новый метод цементирования ТРО пропиткой [12] заключается в том, что цементный раствор под давлением через зонд подают в донную часть контейнера с предварительно размещенными в нем ТРО. Цементный раствор, равномерно двигаясь снизу вверх по каналам между частицами ТРО, заполняет пустоты в насыпном объеме отходов и, затвердевая, образует цементный компаунд, объем которого равен исходному насыпному объему.

При движении цементного раствора через насыпной слой ТРО первоначальное соотношение жидкой и твердой фаз цементного раствора меняется. Причины этого состоят в следующем. Поскольку цементный раствор представляет собой суспензию, то диспергированные в воде частицы твердой фазы в процессе пропитки способны оседать на цементируемом материале. Этот процесс может приводить к обеднению содержания цемента в растворе в последующих слоях пропитываемого материала, в результате чего в них будет цементный раствор с меньшим количеством цемента, с более высоким Р/Ц (например, исходный раствор с Р/Ц=0,6, на выходе – обедненный жидкий раствор с Р/Ц=0,8...1,0), что в конечном итоге ведет к ухудшению качества получаемого продукта. Кроме того, на входе оседающие частицы цемента забивают пустоты пропитываемого материала и препятствуют дальнейшему проведению процесса цементирования, еще более обедняя цементом проникающий в последующие слои раствор. Таким образом, надежность процесса цементирования пропиткой во многом определяется проникающей способностью раствора. Гарантией получения цементного компаунда требуемого качества по всему объему контейнера является заполнение пустот и пор отходов по всему насыпному объему и сохра-

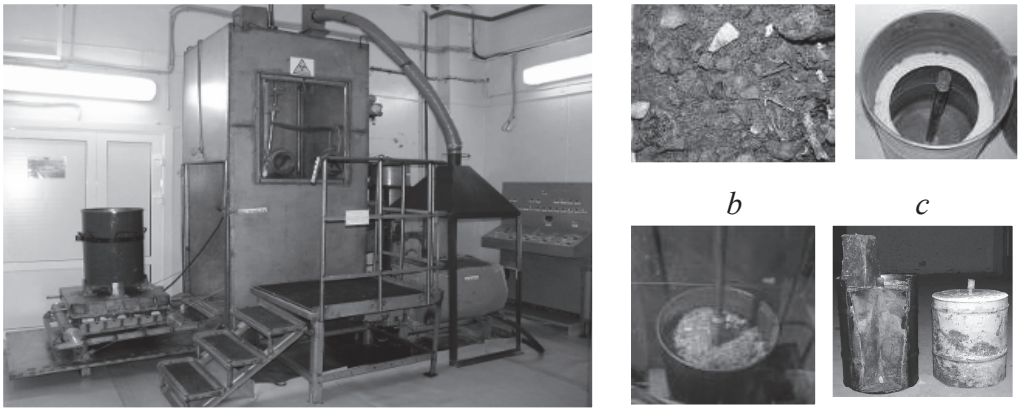


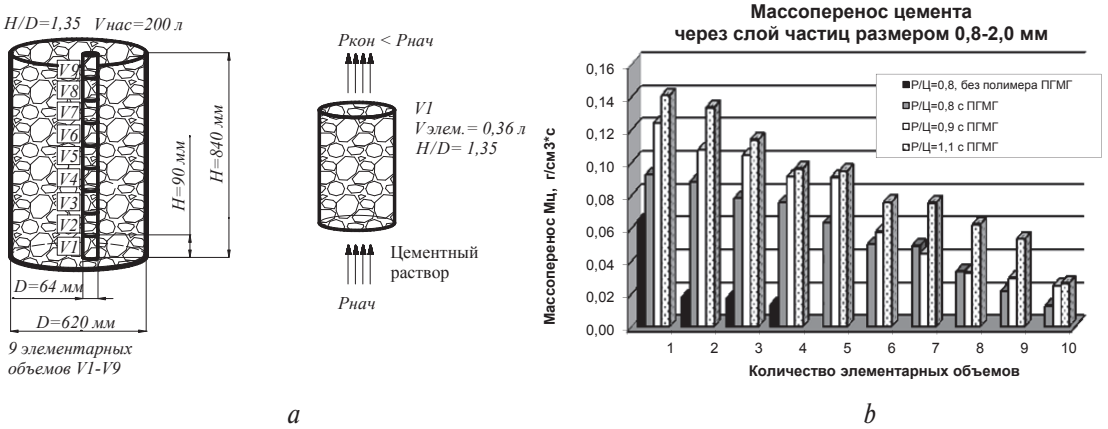
Рис. 4. Цементирование методом пропитки зольного остатка в 200-литровой бочке: a) опытно-промышленная установка; b) исходная радиоактивная зола; c, d) контейнер и зонд; e) конечный компаунд с наполнением по зольному остатку до 70 мас. %

нение свойств проникающего раствора в ходе цементирования.

Метод пропитки ТРО предполагает применение специального цементного материала, при использовании которого цементный раствор отличается высокой проникающей способностью и стабильностью. При цементировании пропиткой зольного остатка с размером частиц 0,5...8,0 мм используется «СПЦК» или «БИЗОН-БПл» с удельной поверхностью $S_{уд}$=6000...13000 см^2/г и добавкой полимера ПГМГ в количестве 1...2 мас. %. Цементный раствор при Р/Ц=0,8...1,2 подается под давлением 0,02...0,10 МПа (рис. 4), линейная скорость пропитки составляет 4...8 см/мин [13]. Точные значения параметров определяются по величине снижения плотности цементного раствора $\Delta\rho=\rho_{\text{в нижних слоях ТРО}} - \rho_{\text{вверху контейнера}}$, которая должна составлять не менее величины, гарантирующей образование компаунда с прочностью 5 МПа по всей высоте контейнера. Установлено, что допустимая $\Delta\rho$ цементного раствора в ходе пропитки зольного остатка составляет ~6 %.

Исследование влияния полимера ПГМГ на проникающую способность цементного раствора (способность раствора проникать по пустотам и каналам насыпного объема отходов, не изменяя соотношения твердой и жидкой фазы, т. е. не фильтруясь и не расслаиваясь) показало, что ПГМГ выступает стабилизирующим и водоудерживающим компонентом цементного раствора, что позволяет достичь большего массопереноса частиц цемента в верхние слои насыпного объема ТРО.

Лабораторные исследования проникающей способности проводили на экспериментальной установке, пропуская многократно цементные растворы с ПГМГ и без ПГМГ под давлением 0,01 МПа через колонку объемом 0,36 л с мелкодисперсными ТРО. Приняв соотношение высоты к диаметру колонки равным 1,35, что соответствует параметрам 200-литровой стандартной бочки, считали один колоночный объем лабораторной установки элементарным объемом реального контейнера (рис. 5, *a*). Значения массопереноса цемента $M_ц$ рассчитывали по формуле $M_ц=m_ц/(V_{св}t)$, где $m_ц$ – масса твердой фазы, прошедшей через элемен-



a *b*

Рис. 5. Проникающая способность цементных растворов в присутствии полимера ПГМГ: a) моделирование элементарного объема пропитываемого материала; b) массоперенос частиц цемента через насыпной слой ТРО (размер частиц 0,8...2,0 мм)

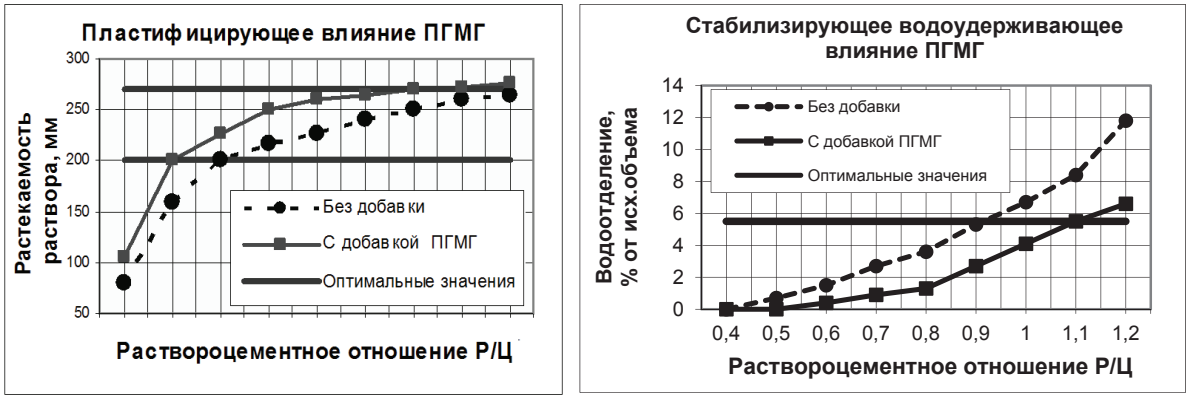


Рис. 6. *Пластифицирующие и водоудерживающие свойства полимера ПГМГ*

тарный объем, г; $V_{св}$ – свободный объем в элементарном объеме при данной пустотности, см^3; t – время прохождения раствора через элементарный объем, с.

Водоотделение цементного раствора в статических условиях определяли по ГОСТ [14], пластифицирующее влияние ПГМГ определяли по увеличению растекаемости цементного раствора в присутствии данного полимера по методике [15], результаты представлены на рис. 6.

Данные рис. 6 подтверждают, что полимер ПГМГ повышает проникающую способность цементных растворов в 2...2,5 раза, растекаемость в 1,2 раза, стабильность консистенции в 1,5...1,7 раза, расширяя рабочий диапазон Р/Ц до 0,5...1,1.

Выводы

Показано, что применение биоцидного полимера класса полигексаметиленгуанидинов в технологиях цементирования жидких и твердых радиоактивных отходов низкой и средней активности позволяет не только предотвратить биодеструкцию цементных компаундов при длительном хранении в приповерхностных хранилищах, но и улучшить ряд важных технологических параметров процесса цементирования, повысить прочностные свойства конечного продукта, увеличить степень наполнения по отходам конечных компаундов и расширить ассортимент радиоактивных отходов, принимаемых на цементирование.

Работа частично выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Госконтракт № П755 от 20.05.2010).

Автор приносит искреннюю благодарность коллективу сотрудников ГУП МосНПО «Радон» под руководством к.т.н. А.П. Варлакова за совместные лабораторные и опытно-промышленные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.
2. Горбунова О.А. Защита зацементированных РАО от микробиологической коррозии // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 3. – С. 126–130.
3. Горбунова О.А. Состояние гидратированных цементных минералов под действием биокоррозии // Вестник МГСУ. – 2010. – № 3. – С. 76–81.
4. Gorbunova O.A., Sukhov A.A., Barinov A.S. Biocorrosion of Cemented Radioactive Waste // Conditioning of Radioactive Operational & Decommissioning Wastes (KONTEC'2011): 10th Intern. Symp. – Dresden, April, 06–08, 2011. – on CD-ROM. – P. 634–638.
5. Баринов А.С., Варлаков А.П., Горбунова О.А. Модифицирующие комплексные добавки в технологиях цементирования радиоактивных отходов // Медицина труда и промышленная экология. – 2006. – № 2. – С. 29–34.
6. Биоцидный цементный раствор: пат. 2197760 Рос. Федерация. № 2001111084; заявл. 25.04.01; опубл. 27.01.03, Бюл. № 3. – 12 с.
7. Гембицкий П.А., Воинцева И.И. Полимерный биоцидный препарат класса полигексаметиленгуанидинов. – Запорожье: Полиграф, 1998. – 44 с.
8. ТУ 5743-159-46854090-2003. Комплексная добавка проникающего и защитного действия «БИЗОН». Технические требования.
9. ТУ 5734-001-56873527-2006. Специальный портландцемент с композиционной добавкой «СПЦК». Технические требования.
10. Способ цементирования жидких радиоактивных отходов, содержащих минеральные масла и/или органические жидкости, и устройство для его осуществления: пат. 2317605 Рос. Федерация. № 2006123654; заявл. 04.07.06; опубл. 20.02.08, Бюл. № 5. – 25 с.
11. Горбунова О.А. Цементирование твердых радиоактивных отходов методом пропитки высокопроникающими растворами: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004. – 269 с.
12. Способ цементирования твердых радиоактивных отходов, содержащих мелкозернистые материалы: пат. 2142657 Рос. Федерация. № 98117020; заявл. 03.09.98; опубл. 10.12.99, Бюл. № 34. – 7 с.
13. Устройство для цементирования пропиткой мелкодисперсных радиоактивных и токсичных отходов: пат. 2199164 Рос. Федерация. № 2001110423; заявл. 18.04.01; опубл. 20.02.2003, Бюл. № 5. – 11 с.
14. ГОСТ 10181-2000. Смеси бетонные. Методы определения расслаиваемости. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 8 с.
15. МВИ-144-08. ФР.127.2009.05740. Определение растекаемости цементных растворов методом линейных измерений с помощью прибора «Конус АзНИИ КР-1» / Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон», разраб. О.А. Горбунова, утв. А.С. Баринов, Аттестат Аккредитации № РОСС RU. 0001.512711 от 09.11.2010 (действ. до 09.11.2015), инв. № 811. – Сергиев Посад, 2008. – 9 с.

Поступила 15.06.2011 г.

УДК [621.039+621.311.24:621.039]:614.876(470+571)

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ УРАН-ГРАФИТОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

М.С. Хвостова

Филиал Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (Севмашвтуз), г. Северодвинск
E-mail: marinakhvostova@list.ru

Освещены вопросы предстоящего вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых ядерных реакторов и исследовательских ядерных установок. Показано, что основные вопросы обеспечения радиационной безопасности связаны с обращением с облученными графитовыми кладками, активированными металлоконструкциями, радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.

Ключевые слова:
Уран-графитовые ядерные реакторы, исследовательские ядерные установки, радиоактивные отходы, отработавшее ядерное топливо.

Key words:
Uranium-graphite nuclear reactors, nuclear research facilities, radioactive waste, spent nuclear fuel.

Введение

С конца сороковых годов до середины шестидесятых в СССР было введено в эксплуатацию тринадцать уран-графитовых реакторных установок промышленного назначения (ПУГР). Большая часть этих установок были прямоточными (со сбросом охлаждающей активную зону воды в открытый водоем). Пять установок работали в двухцелевом режиме, т. е. помимо наработки оружейного плутония вырабатывали также тепло и электроэнергию.

Основными причинами прекращения эксплуатации промышленных реакторов являются:

- выработка ресурса реактора и реакторного оборудования;
- несоответствие действующим нормам и правилам;
- падение спроса на вырабатываемую продукцию.

Исследовательские ядерные установки (ИЯУ) играют важную роль в развитии ядерной энергетики и, в том числе, в вопросах обеспечения безопасности ядерных установок. Без осуществления широкой программы фундаментальных и прикладных исследований на ИЯУ невозможно обоснование безопасности объектов ядерной энергетики.

Как и все объекты использования атомной энергии, ИЯУ представляют собой источники ядерной и радиационной опасности. Несмотря на более низкие мощности и, соответственно, меньшие количества радиоактивных веществ, образующихся в результате эксплуатации ИЯУ, их потенциальная опасность для населения и окружающей среды все же велика в силу ряда специфических особенностей. Вывод из эксплуатации ИЯУ также имеет свою специфику.

Вывод из эксплуатации промышленных уран-графитовых ядерных реакторов

Промышленные реакторы первого и второго поколений были спроектированы без учета требований ремонтопригодности или имели очень низкие показатели этой характеристики. Это связано с тем, что предполагаемое время их эксплуатации составляло менее 10 лет. Фактически срок эксплуатации составил 30–40 лет. Лишь отдельные реакторы были остановлены и выводятся из эксплуатации, не выработав проектного срока (таблица) [1, 2].

Таблица. *Промышленные ядерные реакторы*

Предприятие, месторасположение	Название реактора	Тип реакторной установки	Поколение реакторной установки	Год		
				Ввода	Остановки	Реконструкция
Производственное объединение «Маяк», г. Озерск (г. Челябинск-65)	А	УГК	I	1948	1987	1963
	АИ-ИР	УГК	I	1951	1987	
	АВ-1	УГК	II	1950	1989	1973
	АВ-2	УГК	II	1951	1990	1972
	АВ-3	УГК	II	1952	1990	1975
	ОК-180	ТВК	I	1951	1966	–
	ОК-190	ТВК	I	1955	1965	1962
	ОК-190М	ТВК	I	1966	1985	
	Руслан	ВВР	I	1979		
	Людмила	ТВК	II	1986		
Сибирский химкомбинат, (СХК), г. Северск (г. Томск-7)	И-1	УГК	I	1955	1989	1979
	ЭИ-2	УГКЦ	II	1957	1990	1967, 1980
	ОК-140	УГКЦ	III	1961	1992	1967
	ОК-204	УГКЦ	III	1963	2008	1967
	ОК-205	УГКЦ	III	1965	2008	1969
Горно-химический комбинат, (ГХК), г. Железногорск (г. Красноярск-26)	ОК-120	УГК	II	1958	1992	
	ОК-135	УГКЦ	III	1962	1993	1969
	ОК-206	УГКЦ	III	1964	2009	1970

Примечание: уран-графитовый канальный – УГК; тяжеловодный корпусной – ТВК; уран-графитовый канальный двухцелевой – УГКЦ, ВВР – водо-водяной реактор.

В утвержденной «Концепции вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов» [2] рассмотрены рекомендуемые варианты вывода из эксплуатации (ВЭ) промышленных уран-графитовых ядерных реакторов, основные этапы

и направления работ, принципы и критерии безопасности их проведения.

Основными разделами Концепции являются:

- Цели, назначение и область применения концепции.
- Обоснование выбора варианта ВЭ ПУГР и площадки их размещения.
- Основные принципы осуществления деятельности по выводу из эксплуатации реакторов.
- Основные направления деятельности и этапы ВЭ ПУГР.
- Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации реакторов.
- Научно-техническое и технологическое обеспечение реализации концепции.
- Финансово-экономическое обеспечение реализации концепции.

Цель настоящей Концепции:

- формирование основных положений вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов – наработчиков оружейного плутония – по варианту безопасной изоляции и захоронения на месте;
- определение направлений дальнейших работ по обоснованию предлагаемого варианта вывода из эксплуатации ПУГР в качестве базового с обеспечением ядерно- и радиационнобезопасного захоронения на месте.

Концепция разработана на основе исследований по созданию изолирующих барьеров, прогнозных расчетов и технико-экономических исследований, показывающих принципиальную возможность, безопасность, экономическую и экологическую целесообразность окончательной изоляции ПУГР как объекта захоронения уникальных радиоактивных отходов (РАО).

Основные этапы работ по выводу из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов, принятые в Концепции:

- подготовка к выводу из эксплуатации;
- этап 1 – производство работ на реакторе, за пределами шахты и площадке размещения ПУГР;
- этап 2 – мониторинг;
- этап 3 – ликвидация (срок выдержки 10 лет)/ долговременное хранение (гарантированный срок безопасного хранения не менее 100 лет)/ захоронение без намерения ликвидации.

Решение о варианте реализации 3-го этапа принимается по завершении этапа мониторинга. В соответствии с НП-007-98 при подготовке к ВЭ ПУГР производится останов реактора и выполняются работы, связанные с полной выгрузкой ядерного топлива из реактора, включая передачу ядерного топлива из бассейнов выдержки и других транспортно-технологических емкостей на радиохимический завод для переработки или в специальное хранилище отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Разработанные проекты вывода из эксплуатации промышленных реакторов имеют следующие существенные недостатки:

- отсутствуют общие требования к системе контроля состояния основных несущих металлоконструкций, необходимые для оценки несущей способности конструкций в течение 30–50 лет. Следствием этого является невозможность определения срока службы металлоконструкций ввиду неопределенности их состояния и соответственно отсутствие оптимальных вариантов укрепления металлоконструкций, что и привело к задержке реализации всего комплекса работ по второму этапу снятия с эксплуатации;
- отсутствуют доказательства невозможности образования в отглушенных пространствах взрывчатых газовых смесей под воздействием остаточной радиации;
- третий этап, представленный в проектах вывода из эксплуатации, носит концептуальный характер;
- нет конкретных планов по оптимизации дозовых нагрузок и материальных затрат на дальнейший демонтаж реактора;
- не разработаны способы демонтажа и обращения с образующимися при этом отходами разного уровня и разных видов радиоактивности.

При выполнении работ по ВЭ должно быть учтено следующее:

- почти все остановленные реакторы расположены в местах с большим количеством грунтовых вод и являются активными их загрязнителями, то есть необходимо определение требований с последующей разработкой технических решений по предотвращению выноса радиоактивности;
- на территории реакторных заводов имеются захоронения и хранилища РАО разных видов;
- при разборке графитовых кладок реакторов «А», «ЭИ», «АВ-1» и «АВ-2» (ПО «Маяк») необходимо учитывать, что кладки имеют большие каверны, заделанные пастой на основе бакелитового лака.

В связи с отсутствием в проектах по ВЭ промышленных реакторов данных о прогнозируемой прочности металлоконструкций основных схем реакторов, возможности загрязнения грунтовых вод радиоактивными изотопами, динамике выбросов в вентиляционную систему радиоактивных изотопов и системе удаления образующихся радиолитических газов предприятиям необходимо провести дополнительные мероприятия, с целью получения необходимой информации.

Радиационная опасность остановленных реакторов обусловлена активацией быстрыми нейтронами металлоконструкций (с образованием радиоактивных нуклидов кобальта, железа и марганца), азота (с образованием радиоактивного нуклида ^{14}C) и лития (с образованием трития). Особую опасность представляют углерод и тритий, которые могут активно участвовать во всех биологических процессах и практически не выводятся из организма.

Кроме того, в результате многочисленных аварий, имевших место при эксплуатации (А, АИ, АВ-1 и АВ-2), в графитовых кладках находится относительно большое количество продуктов деления урана, попавшего в графитовые кладки при сверлении разрушившихся тепловыделяющих элементов, частично – с образованием карбидов [3].

Аварии и длительная эксплуатация этих реакторов привели к накоплению дефектов графитовых кладок (растрескивание, усадка и распухание блоков, искривление колонн).

В настоящее время выводятся из эксплуатации 13 ПУГР. Все выводимые из эксплуатации ПУГР приведены в ядерно-безопасное состояние и находятся в стадии подготовки к длительной выдержке. После выгрузки топлива были получены соответствующие заключения отдела ядерной безопасности Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского о ядерной безопасности графитовых кладок этих реакторов.

Радиационная обстановка за последние годы на выводимых из эксплуатации ПУГР характеризуется стабильностью и отсутствием превышений эффективной дозы облучения работников свыше установленных пределов. Нарушений в работе систем и оборудования, важных для безопасности, не зафиксировано.

После окончательного останова на ОАО «Сибирском химическом комбинате» (ОАО «СХК», г. Томск) реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 в рамках разрешенного вида деятельности на реакторе АДЭ-5 в 2009 г. начат демонтаж оборудования. Проведена кислотная отмывка 9-ти парогенераторов реактора АДЭ-5, проводятся работы по локализации источника течи промбассейна (ПБ) и транспортно-технологических емкостях (ТТЕ) зданий 450, 451, выполнен сбор россыпи облученных ДАВ-90 и ОСУБ в ПБ здания 450 и ТТЕ здания 451. Существующая система обеспечения ядерной и радиационной безопасности на Радиохимическом заводе ОАО «СХК» за отчетный период в основном соответствовала требованиям действующих норм и правил в области использования атомной энергии, условиям действия лицензий. Дозовые нагрузки на персонал не превышали установленных на предприятии контрольных уровней [4].

Оценки затрат на вывод из эксплуатации ПУГР представлены на примере реакторов АДЭ-4,5 СХК. Общие затраты на вывод из эксплуатации реакторов АДЭ-4,5 по варианту длительной выдержки (на период до 100 лет) оцениваются в 6,7 млрд р. Затраты на содержание и мониторинг остановленных реакторов АДЭ-4,5 в течение 100 лет оцениваются в 4,1 млрд р (цены 2007 г.), т. е. более 60 % от общей стоимости работ по выводу их из эксплуатации. Создание и эксплуатация комплекса по переработке образующихся при выводе из эксплуатации реакторов РАО (1500 т облученного графита, 1900 т активированного металла, 1200 т боратовой руды – в среднем на реактор), потребует дополнительно свыше 3,0 млрд р. Затраты на выполнение работ по выводу из эксплуатации ПУГР по варианту «захоронение на месте» соизмеримы с затратами по подготовке реакторов к длительному хранению и составляют от 1,5 до 2 млрд р на реактор [5].

Вывод из эксплуатации исследовательских ядерных установок

До 1993 г. на территории бывшего Советского Союза эксплуатировалось более 110 исследовательских ядерных установок, расположенных, как правило, на территории крупных городов, в том числе и в Москве. Большинство исследовательских реакторов (ИР), критических (КС) и подкритических стендов (ПКС) было построено и эксплуатируется с конца 1950-х – начала 1960-х гг., и их состояние требует постоянного внимания с точки зрения обеспечения безопасности.

По состоянию на 01.01.2011 г. в России имеется 74 ИЯУ, из них – 25 – это ИР, 28 – КС, 11 – ПКС, выведено из эксплуатации – 8 ИЯУ, 2 ИЯУ сооружаются.

Из 25 действующих ИР – 50 % имеют срок эксплуатации 30 лет и более (рис. 1).

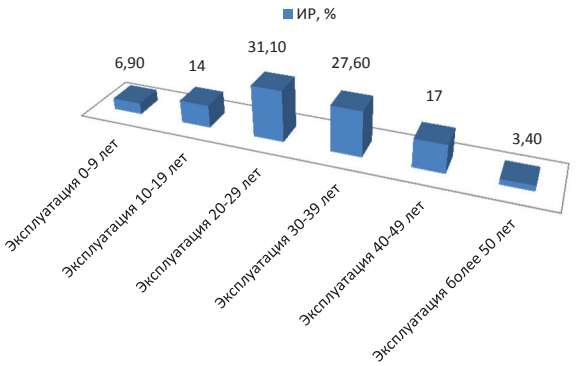


Рис. 1. *Длительность эксплуатации действующих исследовательских реакторов*

Аналогичная ситуация сложилась с КС и ПКС, где ~46 % составляют «старые» установки (рис. 2).

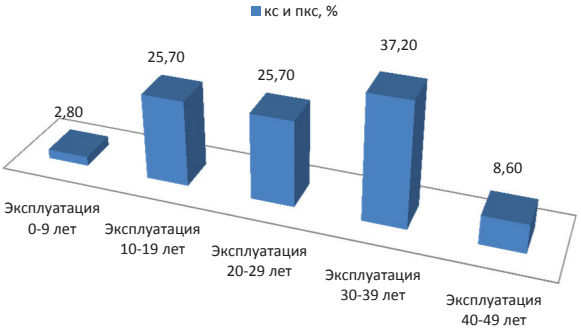


Рис. 2. *Длительность эксплуатации действующих критических и подкритических стендов*

По потенциальной опасности вышеназванные установки можно разделить на следующие основные группы:

- 1-я группа – исследовательские реакторы (испытательные) мощностью до 100 МВт, для которых возможны запроектные аварии по всем уровням Международной шкалы оценки ядерных событий (INES). Реакторы этой группы предназначены, главным образом, для испытаний материалов и оборудования для атомной энергетики;
- 2-я группа – исследовательские реакторы мощностью до 20 МВт, предназначенные для учебных целей, фундаментальных физических исследований и производства радиоактивных изотопов;
- 3-я группа – исследовательские реакторы мощностью до 1 МВт, критические и подкритические стенды практически нулевой мощности, не требующие систем принудительного аварийного расхолаживания активной зоны. К этой же группе могут быть отнесены импульсные реакторы.

При этом максимальный объем требований по безопасности, содержащихся в нормах и правилах, применим к 1-й и 2-й группам реакторов вышеприведенной классификации.

Сокращение объема требований для 3-й группы возможно только с учетом наличия у них свойств самозащищенности и на основе конкретных обоснований безопасности, представляемых их владельцами для проведения независимой экспертизы.

Сейчас стадии вывода из эксплуатации находятся 8 ИЯУ: исследовательские реакторы ТВР (ФГУП «Государственный научный центр РФ – Институт теоретической и экспериментальной физики» (ФГУП «ГНЦ РФ-ИТЭФ»)), ВВРЛ-02 и ВВРЛ-03 (ФГУП «Научно-исследовательский институт приборов» ФГУП «НИИП»)), АСТ-1 и РБТ 10/1 (ОАО Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов (ОАО «ГНЦ НИИАР»)); критические стенды РФ-ГС и «Стрела» (Государственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского («ГНЦ РФ-ФЭИ»)), СТ-1120 (ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова» ОАО «ОКБМ Африкантов»). Также выводится из эксплуатации пункт хранения отработанного ядерного топлива (ПХ ОЯТ), расположенный на территории ФГУП НИИП. В 2009 г. ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» подано заявление в Ростехнадзор на выдачу лицензии на вывод из эксплуатации исследовательского ядерного реактора АМ.

В целом процесс вывода из эксплуатации идет медленно из-за недостаточного уровня финансирования. Также одной из проблем обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ИЯУ является проблема вывоза ОЯТ и РАО с территорий эксплуатирующих организаций и их дальнейшей утилизации. Это в первую очередь связано с высокой стоимостью услуг на данные виды работ на специализированных предприятиях.

При выводе из эксплуатации ИЯУ необходимо учитывать следующие, присущие только им особенности:

- конструктивное разнообразие ИЯУ, затрудняющее разработку унифицированных решений:
- отсутствие (в силу существовавших ограничений со стороны секретности и общих высоких темпов проведения работ как во время создания ИЯУ, так и при различного вида реконструкциях) проектно-конструкторской документации в объемах, достаточных для полной оценки особенностей конструктивных решений как заложенных в начальные проекты, так и реализованных уже в процессе эксплуатации;
- более высокую во многих случаях в сравнении с блоками АЭС наведенную активность элементов конструкций ИЯУ, расположенных вблизи активной зоны;
- наличие в составе ИЯУ достаточно большого числа экспериментальных устройств, требующих детальной проработки технологии проведения демонтажных работ;
- условия эксплуатации ИЯУ в основном в составе научно-технических комплексов, включающих и другие радиационно опасные объекты;
- размещение ИЯУ в непосредственной близости от городских жилых районов, что выдвигает повышенные требования к безопасности при проведении работ.

В отличие от АЭС при выводе из эксплуатации ИЯУ особое внимание следует уделить отсутствию на ИЯУ:

- штатных систем дезактивации, что требует специальной разработки; эффективных и экономичных технологий дезактивации оборудования, трубопроводов и помещений;
- специальных средств технологического оснащения для демонтажа и фрагментации разнообразного радиоактивного оборудования, систем и трубопроводов.

Обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом

Существовавшие до последнего времени схемы обращения с РАО не ставили перед собой задачу окончательного решения проблемы, поскольку базировались на принципе отложенного решения, что на практике означало ограничение схемы обращения с РАО только этапами сбора и временного хранения некондиционированных отходов, а обращение с ОЯТ, не подлежащим переработке, – временным хранением в местах образования, то есть на площадках соответствующих объектов использования атомной энергии.

Неэффективность существующей системы обращения с РАО, несовершенство действующей нормативно-правовой базы обращения с РАО, предстоящее увеличение их объемов в связи с предстоящим выводом ИЯУ из эксплуатации дик-

туют необходимость создания Единой государственной системы управления деятельностью по обращению с РАО и, в первую очередь, принятие Федерального закона об обращении с РАО.

В настоящее время Госкорпорация «Росатом» подготовлен проект Федерального закона «Об обращении с РАО», который устанавливает правовые основы деятельности при обращении с отходами, определяет принципы, систему и порядок финансирования обращения с РАО. Проектом закона предусмотрено создание «Единой государственной системы управления деятельностью по обращению с РАО», которая позволит решить многочисленные проблемы по обращению с РАО.

Отработавшее ядерное топливо сосредоточено в основном на территориях следующих организаций: РНЦ «Курчатовский институт»; ФЭИ; НИИАР; СФ НИКИЭТ; филиала НИФХИ.

В имеющихся на реакторных установках РНЦ «Курчатовский институт» хранилищах ОЯТ скопилось около 900 шт. отработанных тепловыделяющих сборок общей массой порядка 15 т, их суммарная активность, по экспертным оценкам, превышает $3 \cdot 10^6$ Ки. Нахождение в городской черте хранилища ОЯТ, безусловно, создает ситуацию, требующую тщательного анализа и контроля за дальнейшим его использованием.

Заключение

Вопрос вывода из эксплуатации ядерных установок с промышленными уран-графитовыми реакторами представляет собой комплекс проблем, связанных с необходимостью выбора оптимальных способов и методов обращения с накопленными РАО. Среди всей массы накопленных РАО облученный графит ПУГР занимает особое место. После длительного облучения графит не приобрел никаких свойств, которые могли бы создать область его полезного применения. Поэтому облученный графит относится к категории неиспользуемых РАО и требует индивидуального подхода при выборе способов обращения с ним.

Анализ показывает, что с позиций обеспечения радиационной безопасности на этапе длительного хранения графитовой кладки в пределах шахты представляют интерес содержащиеся в ней радионуклиды и потенциальные возможности их поступления в атмосферу и/или гидросферу, как в нормальных, так и в аварийных условиях.

На основании вышеизложенного показано, что все объекты использования атомной энергии, ИЯУ представляют собой источник ядерной и радиационной опасности. Несмотря на более низкие мощности и соответственно меньшие количества радиоактивных веществ, образующихся в результате эксплуатации ИЯУ, их потенциальная опасность для населения и окружающей среды все же велика в силу ряда специфических особенностей. Более 50 % ИЯУ имеют срок эксплуатации 30 и более лет.

Промышленные уран-графитовые ядерные реакторы, как и большинство исследовательских ядерных установок, являются радиационным наследием ранее существовавших оборонных программ, поэтому вопросы вывода их из эксплуатации решаются недостаточно оперативно, в отличие от АЭС, где отчисления на вывод из эксплуатации заложены в тарифе на выработанную электроэнергию. Вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии рассматривается Госкорпорацией «Росатом» как неизбежная дополнительная нагрузка к их основной деятельности. Бесперспективность такого подхода осознана в ряде зарубежных стран, где для разработки долгосрочной технической политики в области вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии, контроля ее исполнения и координации усилий всех причастных к этой проблеме компаний и финансовых институтов, организуются специальные агентства, деятельность которых будет сосредоточена исключительно на выводе из эксплуатации ядерных и радиационно опасных объектов. Опыт работы этих агентств заслуживает самого пристального внимания в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.М., Чеченов Х.Ж. Российская и мировая атомная энергетика. – М.: МГУ, 2008. – 764 с.
2. Концепция вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов, инв. № 04 01281. Утв. Федеральным агентством по атомной энергии 04.02.2005 г.
3. Кузнецов В.М. Основные проблемы и современное состояние безопасности предприятий ядерного топливного цикла Российской Федерации. – М.: Агентство «Ракурс Продакшн», 2002. – 263 с.
4. Кузнецов В.М., Чеченов Х.Д., Никитин В.С. Вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии. – М.: Изд-во ООО «НИПКЦ Восход-А», 2009. – 628 с.
5. Кузнецов В.М., Никитин В.С., Хвостова М.С. Радиоэкология и радиационная безопасность (история, подходы, современное состояние). – М.: ООО «НИПКЦ Восход-А», 2011. – 1208 с.

Поступила 08.06.2011 г.

УДК 502.55

ИЗУЧЕНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В КОМПОНЕНТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, НА ПРИМЕРЕ ХИНГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛОВЯННЫХ РУД ЕВРЕЙСКОЙ АО

М.В. Горюхин

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан
E-mail: goruhin@mail.ru

Исследуется вынос тяжелых металлов с территории разрабатываемого в недавнем прошлом Хинганского месторождения олова. Полученные результаты указывают на выраженное загрязнение почв и вод р. Левый Хинган и его притоков солями тяжелыми металлами. Ряд загрязнителей по уменьшению концентрации в анализируемых средах, представлен следующим образом: в воде – Ni>Fe>Mn>Cu; в водных вытяжках почв и отходов обогащения – Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Cu>Co>Sn>Cd; в вытяжках аммонийно-ацетатным буферным раствором – Zn>Mn>Fe>Pb>Cu>Cd>Co>Ni. Установлено, что наибольшие превышения концентраций солей тяжелых металлов в воде характерны для никеля – до 8,6 ПДК, железа – 5,5, марганца – до 4,7; в почве для цинка – свыше 40, свинца – свыше 15, марганца – свыше 10 ПДК.

Ключевые слова:
Тяжелые металлы, загрязнение, горнодобывающее производство, природные воды, экология.

Key words:
Heavy metals, pollution, mining industry, natural waters, ecology.

Дальний Восток России – один из богатейших регионов, обладающий разнообразными минеральными ресурсами. Их добыча – одна из основных отраслей экономической специализации. Особое место в ней занимает цветная металлургия, что связано с наличием большого количества различных месторождений цветных металлов: золота, серебра, платины, оловянных, олово-полиметаллических, полиметаллических и др.

Еврейская автономная область (ЕАО) расположена в южной части Российского Дальнего Востока. На её территории известны разнообразные полезные ископаемые, такие как железо, марганец, графит, брусит, бурый уголь и др. [1]. Важное место в экономике до недавнего времени занимала добыча олова Хинганского месторождения. Оно находится на северо-западе области, в непосредственной близости от пгт. Хинганск, население которого преимущественно было занято в горнодобывающей отрасли. Здесь функционировал горно-обогатительный комбинат и за многие годы накоплены большие объемы отходов добычи и обогащения, складированные в трех хвостохранилищах.

Извлечение и переработка руд цветных и благородных металлов сопровождается существенным нарушением всех компонентов природной среды – рельефа, почвенного и растительного покрова, поверхностного и подземного стоков, растительного и животного мира, состава атмосферы и др. Завершение эксплуатации горнопромышленных объектов не означает прекращения их негативного воздействия; оно продолжается в результате процессов гипергенного изменения рудных минералов, вскрытых горными выработками, накопленных в отвалах и хвостохранилищах, в результате чего образуются различные соединения, в том числе и тяжелых металлов (ТМ), которые могут поступать в поверхностные и подземные воды, изменяя тем самым их качество [2, 3]. В тоже время населенные пункты, расположенные в районах разработки месторождений, со всей промышленной, жилищной и социальной инфраструктурой также воздействуют на компоненты окружающей природной среды. Поэтому, мониторинг, осуществляемый природоохранными организациями за качеством воды р. Левый Хинган, в пробах, отбираемых выше и ниже по течению пос. Хинганск, не позволяет выявить влияние последствий разработки Хинганского месторождения на качество в воды в данном водоеме.

Целью работы является изучение поступления ТМ в окружающую среду из отвалов пустых пород, хвостохранилищ, а также с территории открытых горных выработок Хинганского месторождения олова и их влияние на качество поверхностных вод р. Левый Хинган, который является одним из основных источников водоснабжения для пгт. Хинганск, Еврейской АО.

Реестр ТМ для анализа обоснован минеральным составом месторождения, для которого помимо касситерита (SnO_2), характерно присутствие сульфидов Fe, Cu, Pb, Zn. Они в качестве примесей могут содержать соединения Ni, Cd и Co. Кроме того, Fe и Mn являются характерными загрязнителями почв и поверхностных водотоков Буреинской геохимической провинции [4].

Район работ. Объектом данного исследования является территория Хинганского месторождения олова, входящего в состав Хингано-Олонойского рудного района, большое количество оловянных и олово – полиметаллических месторождений и проявлений которого могут определять естественный фон ТМ для данной территории [5]. Границы месторождения фиксируются гидрографической сетью, а именно: северо-западная – рекой Левый Хинган, юго-восточная – ключом Малиновый, северо-восточная – ключами Левый Буферный и Буферный. Разработка месторождения была

прекращена без проведения на хвостохранилищах необходимых в таких случаях рекультивационных работ.

Главным рудным минералом является касситерит (SnO_2), сопутствующими – соединения свинца, цинка, меди, железа, которые представлены в виде сульфидов: галенит (PbS), сфалерит (ZnS), халькопирит ($CuFeS_2$) и борнит (Cu_3FeS_4), арсенопирит (FeAsS), а также пирит (FeS). Количество касситерита выше, чем суммарные количества сульфидов; халькопирита значительно меньше, чем сфалерита и галенита, в срастании с которыми он находится. Сульфиды железа в рудах месторождений района редки. Если выразить содержание сульфидов свинца, меди и цинка по отношению к касситериту, количество которого в руде составляет 0,7 %, то получиться следующее соотношение Sn:Pb:Cu:Zn=1:0,17:0,07:0,24 [6].

Рельеф района исследования – часть горного комплекса Малого Хингана, который является южной частью обширной Хингано-Буреинской горной системы. Максимальная высота исследуемой территории составляет 686 м над уровнем моря. Климат муссонный умеренный, преимущественно континентальный, что выражается в резких отклонениях среднегодовых и среднемесячных зимних температур от среднеширотных. Минимальная температура января –46 °С, максимальная июля +40 °С. Годовое количество осадков составляет 700...800 мм в год. Почвы буротаежные иллювиально-гумусовые, каменисто-щебенистые. Растительность представлена вторичными березняками на месте темнохвойных лесов [1].

Материалами исследования являлись почвы, воды р. Левый Хинган и его притоков, а также техногенные образцы, представляющие собой отходы добычи и обогащения оловянных руд.

Отбор образцов производился в июле 2009 г. Отобрано 9 проб воды в р. Левый Хинган и его притоках: точки № 1 и 3 – фоновый и контрольный створы соответственно. Остальные выбраны с учетом возможного выноса загрязнителей в р. Левый Хинган: с территории месторождения, где активно проводились горные работы; из объектов складирования отходов обогащения (рис. 1). Точки № 5–8 расположены выше поселка, в непосредственной близости от мест ведения горных работ; № 2, 4, и 10 – в его центре, в месте слияния р. Левый Хинган и руч. Буферный; № 9 – в хвостохранилище, которое во время отбора проб было частично заполнено дождевой водой.

Почвы отобраны методом конверта в непосредственной близости от мест горных работ и складирования отходов обогащения (№ 16–20), а также ниже и выше поселка по течению р. Левый Хинган (№ 11 и 21 соответственно). Четыре пробы (№ 12–15) отобраны во втором и третьем хвостохранилищах на поверхности и глубине в 20...30 см. Они представляют собой отходы обогащения в виде песчаной и песчано-илистой породы светлого серо-коричневого цвета.

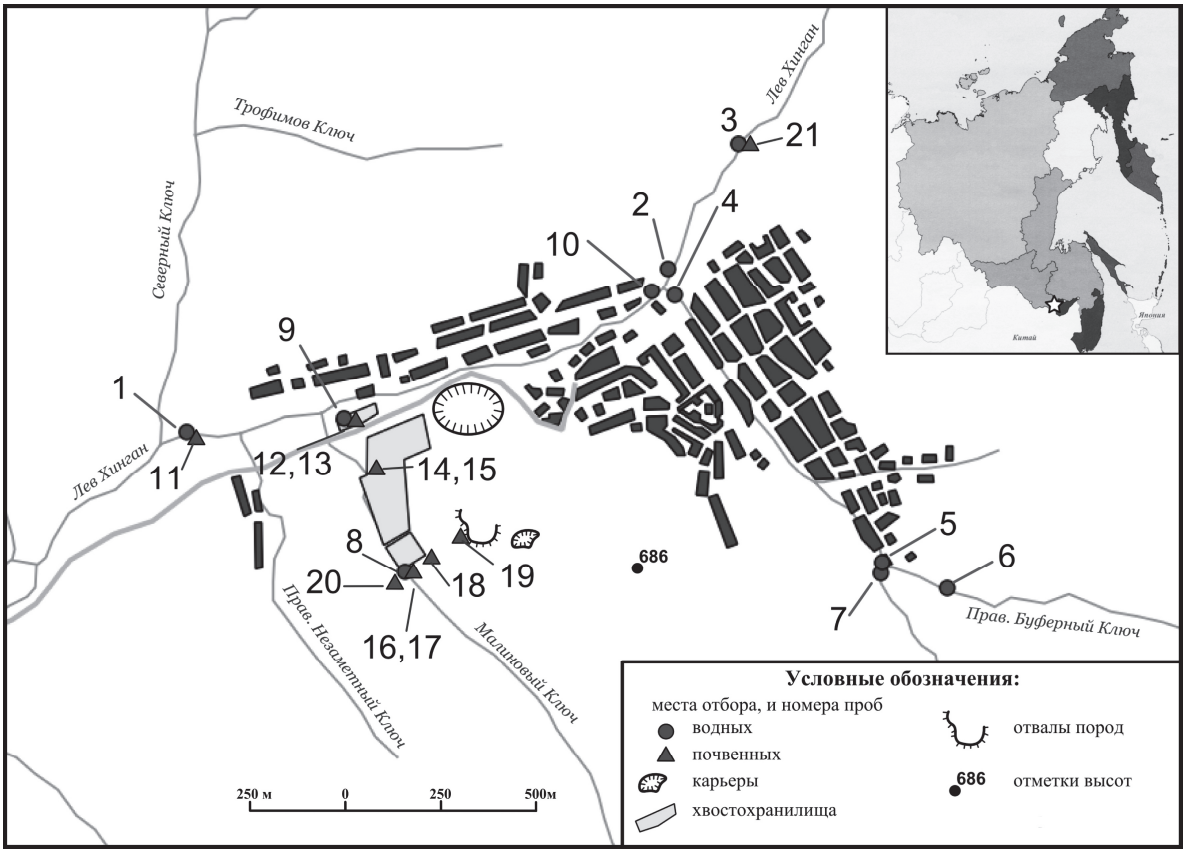


Рис. 1. *Картосхема расположения района исследования*

В почвенных и водных пробах производилось определение водорастворимых и обменных форм ТМ, которые под воздействием атмосферных осадков с поверхностным и подземным стоком, могут мигрировать в водоемы. Приготовление водных вытяжек почв произведено по методике [7], содержание ТМ определялось методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборе «SOLAR M6».

Результаты определения ТМ в водных вытяжках почвенных проб и техногенных грунтов представлены в табл. 1.

Таблица 1. *Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвенных пробах и отходах обогащения, мг/кг*

№ пробы	Fe	Zn	Cu	Pb	Ni	Mn	Co	Sn
Почвы								
11	5,09	4,62	0,39	0,28	1,04	3,74	0	0
16	19,97	2,55	0,45	0,82	0,86	46,16	0,11	0
17	144,97	6,69	6,10	2,63	1,07	3,67	0,04	0,65
18	10,83	7,46	0,86	1,04	0,79	18,56	0,32	0
19	4,09	1,25	0,20	0,58	0,73	23,41	0,11	0,01
20	10,59	4,92	0,38	0,44	0,87	27,39	0	0,01
21	10,26	1,34	0,15	0,57	0,74	27,0	0,28	0
Отходы обогащения								
12	3,97	0,87	0,08	1,04	0,99	0,74	0,05	0,09
13	4,21	2,88	0,29	0,81	0,58	6,16	0,36	0
14	7,65	1,74	0,13	0,82	1,07	1,62	0	0,37
15	20,70	2,65	0,52	1,24	0,96	1,55	0,42	0,06

Для того, чтобы оценить содержание всех выше приведённых ТМ относительно нормативных показателей [8], были приготовлены их вытяжки в аммонийно-ацетатном буферном растворе с pH 4,8 по методике [7], табл. 2.

Таблица 2. *Содержание тяжелых металлов в вытяжках аммонийно-ацетатного буферного раствора почвенных проб и отходов обогащения, мг/кг*

№ пробы	Cd	Fe	Zn	Cu	Pb	Ni	Mn	Co
Почвы								
11	5,89	60,16	678,75	1,81	6,74	0,24	674,72	0,76
16	1,38	173,76	932,55	2,49	26,51	0,17	921,7	0,43
17	0,74	590,45	911,41	1,74	102,55	0,15	55,71	0
18	2,23	152,86	953,58	4,10	30,32	0,30	842,26	0,81
19	0,34	89,69	680,92	0,66	4,29	0,15	850,17	1,32
20	0,15	576,43	679,47	2,19	21,11	0,51	976,09	1,31
21	0,19	222,71	591,39	0,52	4,48	0,53	970,84	0,89
Отходы обогащения								
12	0	211,13	654,90	7,87	113,67	0	85,06	0
13	0,05	339,43	808,04	0,02	80,19	0,35	119,33	0
14	0	111,70	416,01	3,79	10,47	0	76,93	0
15	0	142,96	312,67	3,13	10,39	0	85,25	0

Следует отметить изменение содержания некоторых подвижных форм металлов в аммонийно-ацетатном буфере по сравнению с водной вытяжкой (табл. 1). Например, концентрация никеля уменьшается примерно в 10 раз, в заметных количествах извлекается кадмий, в некоторых пробах исчезает кобальт, в других заметно повышается. Согласно [8], для металлов, у которых установлены предельно допустимые содержания в почве, был произведен перерасчет их в единицы $ПДК_п$ (для олова и железа их нет).

Наибольшие превышения концентраций в почвах и отходах обогащения характерны для цинка – свыше 40 $ПДК_п$, свинца – свыше 15, марганца – свыше 10. Содержания остальных металлов повышенные, однако не превышают пять $ПДК_п$ (рис. 2).

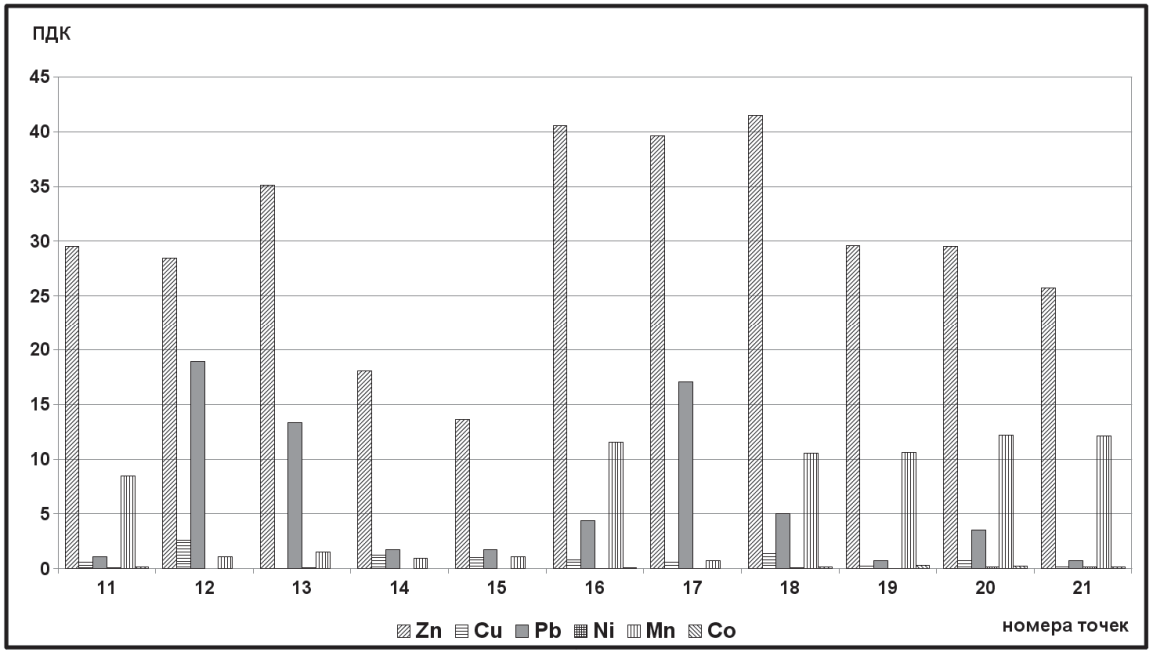


Рис. 2. *Содержание тяжелых металлов в почвах и техногенных грунтах, в единицах $ПДК_п$ (аммонийно-ацетатный буфер)*

Исследования показывают, что с территории месторождения происходит вынос ТМ. Отмечается перенос элементов загрязнителей с вершины склона, где расположены отвалы пустой породы и бедных руд, к подножию, в котором происходит их накопление.

Рассмотрим этот процесс на примере цинка. В долине кл. Малиновый были отобраны пробы почв на ТМ по профилю: вершина склона у подножия отвалов, основание склона, прирусловая часть долины кл. Малиновый, основание противоположного склона (точки № 19, 18, 16, 20, соответственно). Получены следующие результаты (мг/кг): точка № 19 – 680,9; точка № 18 – 953,5; точка № 16 – 932,5; точка № 20 – 679,5 мг/кг Zn. Следовательно, идет процесс накопления в долине кл. Малиновый цинка, откуда происходит его вынос непосредственно в р. Левый Хинган и далее вниз по течению.

Таким образом, в водных вытяжках почв и техногенных образцов полностью отсутствует кадмий, наблюдаются следы кобальта; содержится много природных загрязнителей, таких как железо и марганец, но их значительно меньше, нежели в равнинных районах ЕАО [9], и сравнительно мало меди, никеля, цинка, свинца. Наибольшие концентрации олова отмечаются в глине запирающего почвенного слоя (точка № 17) и отходах обогащения. Ряд элементов – загрязнителей представлен следующим образом: в водных вытяжках почв и отходов обогащения – Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Cu>Co>Sn>Cd (табл. 1); в вытяжках аммонийно-ацетатного буферного раствора – Zn>Mn>Fe>Pb>Cu>Cd>Co>Ni (табл. 2).

Влияние разработки месторождения на качество воды в р. Л. Хинган проявляется в превышении содержания ТМ практически во всех пробах, наибольшие показатели характерны для никеля и железа (табл. 3).

Таблица 3. *Содержание тяжелых металлов в воде р. Левый Хинган и его притоках, мг/дм³/ед. ПДК$_в$*

ТМ	Номера проб									
	1*	2	3**	4	5	6	7	8	9	10
	Содержание тяжелых металлов, мг/дм³/ед. ПДК$_в$									
Fe	0,08 0,26	0,78 2,60	0,40 1,30	1,65 5,50	1,00 3,30	0,65 2,10	1,13 3,70	1,09 3,60	1,62 5,40	1,02 3,40
Ni	0,65 6,50	0,60 6,00	0,29 2,90	0,02 0,20	0,39 3,90	0,58 5,80	0,71 7,10	0,78 7,80	0,86 8,60	0,36 3,60
Cu	1,07 1,00	1,16 1,10	1,84 1,80	1,24 1,20	2,30 2,30	1,85 1,80	1,92 1,90	2,14 2,10	1,95 1,90	1,07 1,00
Mn	0,15 1,50	0,25 2,50	0,18 1,80	0,24 2,40	0,37 3,70	0,32 3,20	0,37 3,70	0,47 4,70	0,17 1,70	0,40 4,00

**Контрольный створ; **фоновый створ. ПДК$_в$ приведены в [10].*

Одна из проб воды (проба № 9) была отобрана в хвостохранилище, куда ТМ могут поступать исключительно из отходов обогащения, поэтому в нашем исследовании мы считаем её своего рода отправной точкой для оценки техногенного вклада в загрязнение природных вод. Например, очень близкие к ней показатели по всем металлам, за исключением марганца, отмечаются в точках № 7 и 8. Они расположены в ключах Малиновый и Левый Буферный в непосредственной близости от мест открытых горных работ, которые собирают воду со склонов, в том числе, пройденными различными горными выработками. На качество воды в этих точках могут влиять заложенные поблизости два карьера, складированные отвалы пустых пород и бедных руд. Уменьшение содержания ТМ в остальных точках вероятно связано с их разбавлением речной водой.

Ниже описаны закономерности содержания отдельных ТМ в пробах воды р. Левый Хинган и его притоках.

Fe. Максимальное значение зафиксировано в точках № 4 и 9: концентрация превышала ПДК$_в$ в 5,5 раза. Высокое содержание было отмечено в пробах № 7, 8, 10 и 2, здесь концентрация железа составляла от 2,6 до 3,8 ПДК$_в$. Наименьшие концентрации установлены в пробах № 1 и 3, где она равнялась 0,3 и 1,3 ПДК$_в$ соответственно.

Ni. Максимальное содержание составило 8,6 ПДК$_в$, оно зафиксировано в пробе № 9 (хвостохранилище). Высокие значения были обнаружены в р. Левый Хинган выше и ниже по течению пгт. Хинганск, ручьях Левый и Правый Буферные, а также в руч. Малиновый (пробы № 1–3, 6–8, и 10,) при этом колебание значений составило от 2,9 до 7,8 ПДК$_в$. Наименьшее значение зафиксировано в пробе № 4, где концентрация составило всего 0,2 ПДК$_в$. При этом размах значений между минимальным и максимальным показателями – 43 раза.

Cu. Максимальное содержание составило 2,3 ПДК$_в$ и было зафиксировано в пробе № 5. Высокие значения отмечались в р. Левый Хинган выше по течению пгт. Хинганск, ручьях Левый и Правый Буферные, хвостохранилище (точки № 3, 5–7, 9), колебание значений было равно примерно 2 ПДК$_в$. В остальных точках колебание значений не велико и составляло от 1,1 до 1,2 ПДК$_в$.

Mn. Максимальная концентрация была отмечена в точке № 8 – 4,7 ПДК$_в$. Высокие значения фиксированы в ручьях Левый и Правый Буферные, Буферный, а также в р. Левый Хинган в месте его слияния с руч. Буферный (точки № 2, 4–7, 10) колебания его содержаний составило от 2,4 до 4 ПДК$_в$. Наименьшие концентрации были в р. Левый Хинган в верхнем и нижнем створах, а также в хвостохранилище (точки № 1, 3 и 9), где разброс значений составил от 1,5 до 1,8 ПДК$_в$.

Результаты исследования указывают на выраженное загрязнение вод р. Левый Хинган и его притоков солями тяжелых металлов. Ряд загрязнителей представлен следующим образом – Ni>Fe>Mn>Cu.

Выводы

Особенности загрязнения природных сред в районе разработки Хинганского месторождения олова заключаются в очень высоких содержаниях цинка и свинца в почве; высоких никеля и железа и повышенных меди в воде р. Левый Хинган и его

притоках. В целом это соответствует минеральному составу месторождения [5, 6].

Содержанию меди в воде не соответствует её количество в почвенных образцах, что может говорить о наличии иных источников поступления. Также неясным и требующим дополнительных исследований является поиск возможных источников загрязнения солями никеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журнист В.И., Коган Р.М., Кодякова Т.Е., Комарова Т.М., Рубцова Т.А. и др. Природные ресурсы Еврейской автономной области. – Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН, 2004. – 112 с.
2. Елпатьевский П.В. Гидрохимические потоки, продуцируемые сульфидизированными техногенными литоаккомуляциями // География и природные ресурсы. – 2003. – № 3. – С. 26–34.
3. Зверева В.П., Зарубина Н.В. Горнопромышленная техногенная система Дальнегорского района Дальнего Востока и ее воздействие на экосферу // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008. – № 6. – С. 500–505.
4. Калманова В.Б., Коган Р.М. Экологическое состояние почвенного покрова г. Биробиджана // Экология урбанизированных территорий. – 2008. – № 4. – С. 46–52.
5. Коростелев П.Г., Семеняк Б.И., Демашов и др. Некоторые особенности вещественного состава руд Хинганского месторождения олова // Рудные месторождения континентальных окраин. – Владивосток: ГУ Дальневост. геол. ин-т, 2000. – Вып. 1. – С. 202–225.
6. Горюхин М.В. Влияние разработки оловянно-полиметаллических месторождений на содержание тяжелых металлов в поверхностных водах, на примере р. Левый Хинган // Региональные проблемы. – 2009. – № 11. – С. 63–66.
7. Практикум по агрохимии / под ред. акад. РАСХН В.Г. Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 689 с.
8. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. От 23 января 2006 г. – № 1.
9. Зубарев В.А., Коган Р.М. Влияние осушительной мелиорации на процессы миграции тяжелых металлов в системе почва-вода-донные отложения // Проблемы агрохимии и экологии. – 2010. – № 3. – С. 29–32.
10. Коган Р.М. Антропогенные загрязнители территории Еврейской автономной области: Справочник. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 166 с.

Поступила 24.06.2011 г.

УДК 591.5;552.578.2;547

СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ВОДОРАСТВОРИМОГО КОМПЛЕКСА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ

М.Г. Кульков, Ю.В. Коржов, В.Ю. Артамонов*, В.В. Углев

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск
*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва
E-mail: mgk83@bk.ru

Проведен лабораторный эксперимент по изучению состава водорастворимого комплекса органических веществ нефтезагрязненной водной среды и особенностей его изменения со временем в условиях постоянного и прерванного контакта воды с нефтяной пленкой. Определен специфичный набор исходных и преобразованных углеводородных и неуглеводородных соединений-индикаторов, указывающих на факт контактирования водной среды с нефтью.

Ключевые слова:
Водорастворимые нефтяные компоненты, нефтяное загрязнение, хромато-масс-спектрометрия, индикаторы.

Key words:
Water-soluble petroleum compounds, oil pollution, chromatography-mass spectrometry, indicators.

Основные компоненты нефтей и нефтепродуктов – углеводороды (УВ), обнаруживаемые при проведении экологического мониторинга, нельзя ассоциировать только с техногенными процессами, так как часть их синтезируется в естественных условиях водными и наземными организмами, преобразуется из органического вещества (ОВ) почв и пород при его разложении или мигрирует из мест концентрирования – нефтяных и газовых месторождений. Стандартные методики, применяемые при экологическом мониторинге, не позволяют установить техногенное или природное происхождение УВ, т. к. результатом их определения является интегральный показатель «нефтепродукты», характеризующий только сумму УВ в составе исследуемого объекта и не дающий представления об их структуре и источнике. Поэтому при обнаружении повышенных концентраций нефтепродуктов, оценке экологического состояния природных объектов, необходимо выяснять происхождение УВ, основываясь на особенностях компонентного состава нефтей, нефтепродуктов и природного ОВ. Использование таких современных аналитических методов, как хроматография, в сочетании с масс-спектрометрией (ХМС), позволяет не только определить сумму УВ, но и идентифици-

ровать компонент или группу ОВ, определить характеристики их изомерного и гомологического состава, наиболее достоверно указывающие на наличие техногенного нефтяного загрязнения и, возможно, его долю в сумме ОВ.

В нашем предварительном модельном эксперименте по контактированию сырых нефтей различных месторождений с водой [1] на основании исследования состава ОВ водных вытяжек был определен специфичный набор нефтяных компонентов-индикаторов, отражающих контакт воды с нефтью. Результаты исследования состава воды после 20 суток контактирования ее с различными нефтями показали, что перспективным индикатором нефтяного загрязнения может служить наличие в воде алкилнафталинов состава C_{10}–C_{13} и фенантрена. Известно, что при поступлении нефти в водный объект она подвергается воздействию комплекса факторов окружающей среды, приводящих к ее распределению по различным формам трансформации и миграции в зависимости от состава и свойств нефти, водной среды и внешних условий [2–4]. Вероятно, и состав водорастворимого комплекса нефтяных соединений-маркеров меняется со временем. Цель настоящего эксперимента заключалась в углубленном изучении состава ОВ нефтезагрязненной водной среды при постоянном контакте воды с нефтяной пленкой и после ее удаления. Предполагалось определить набор исходных нефтяных и образующихся со временем (трансформирующихся) углеводородных и гетероатомных ОВ, характерных для нефтезагрязненной водной среды и не свойственных природному ОВ, указывающих на факт контактирования нефти с водной средой.

Объекты и методы исследования

В эксперименте использованы нефти разных месторождений Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО): Приобского и Тальникового, существенно отличающихся содержанием ароматических УВ (табл. 1).

Получение образцов воды, постоянно контактировавших с нефтяной пленкой. В 4 делительные воронки помещали одинаковый объем бидистиллированной воды и осторожно добавляли определенный объем нефти Приобского месторождения. Таким же образом подготовили параллельную серию из 4 образцов воды с добавлением нефти Тальникового месторождения. Соотношение нефть:вода для всех образцов – 1:200 по объему. Обе серии образцов герметично закрыли и оставили в затененном месте. Через определенное время (16, 48 ч, 7 и 14 суток) после начала контакта осторожно слили по одному образцу воды каждой серии и сразу направили на исследование. Таким образом, получили 8 образцов водных вытяжек (по два параллельных образца в 4 контрольные временные точки), отражающих текущий, на момент отбора, состав воды под соответствующей пленкой нефти.

Получение образцов воды, выдерживавшихся определенное время после прерывания контакта с нефтяной пленкой. В стеклянную емкость с нижним тубусом поместили бидистиллированную воду и осторожно прилили к ней нефть Приобского месторождения. Соотношение нефти к воде – 1:200. Емкость герметично закрыли, оставив в затененном месте, в покое на 45 ч. После этого всю воду осторожно слили через нижний тубус в другую емкость, откуда, через определенное время (16, 48 ч, 7 и 14 суток) после прерывания контакта с нефтяной пленкой, отбирали равные объемы воды на исследование. Таким образом, получили еще 4 образца водных вытяжек, отражавших изменяющийся после прекращения контакта с нефтяной пленкой состав нефтезагрязненной водной среды.

Для достижения поставленной цели в эксперименте приняты некоторые допущения. Используемая бидистиллированная вода, в первом приближении, моделирует пресные озерные и болотные воды ХМАО; разливаемая по поверхности воды пленка нефти моделирует аварийную ситуацию; отсутствие доступа воздуха и активного перемешивания среды замедлит биологические и химические процессы деградации, позволив детальнее охарактеризовать изменения со временем в составе ОВ нефтезагрязненной водной среды.

Аналитические исследования образцов воды заключались в подготовке хлороформенных экстрактов и их ХМС анализе. Подробная схема пробоподготовки, идентификации и количественных расчетов приведены в нашей работе [1].

Отношение содержания н-алканов с нечетным и четным числом углеродных атомов в диапазоне C_{10}–C_{34} (параметр *нч/ч*) и в диапазоне C_{24}–C_{34} (параметр *CPI*) определяли по формулам [1, 2]:

$$CPI = \frac{1}{2}\left[\frac{\sum \text{нечетных } C_{25}-C_{33}}{\sum \text{четных } C_{24}-C_{32}} + \frac{\sum \text{нечетных } C_{25}-C_{33}}{\sum \text{четных } C_{26}-C_{34}}\right];$$

$$\text{нч/ч} = \sum \text{нечетных } C_{11}-C_{35} \Big/ \sum \text{четных } C_{10}-C_{34}.$$

Результаты и их обсуждение

Взятые для эксперимента нефти были направлены на ХМС исследование, которое показало, что по молекулярному составу обе нефти можно отнести к нефтям парафино-нафтенового основания [5], нефти схожи по содержанию насыщенных УВ, имеют близкое распределение четных и нечетных н-алканов, но несколько различаются по соотношению низкомолекулярных и высокомолекулярных н-алканов. Более существенно нефти отличаются содержанием ароматических УВ (табл. 1).

Исследование образцов воды, контактировавшей с нефтями в течение различного времени, показало следующее. Во всех образцах водных вытяжек, как под нефтяной пленкой, так и после

Таблица 1. *Состав УВ нефтей, использованных в эксперименте, в % от суммы идентифицированных УВ*

Образец нефти	Насыщенные						Ароматические				ΣУВ
	н-алканы	нафтены + и-алканы	Σ	*нч/ч*	*CPI*	$\Sigma(C_{10}–C_{22})/\Sigma(C_{23}–C_{35})$	моно-	би-	три-	Σ	
Н1	52,32	31,28	83,6	0,93	0,87	2,08	9,61	5,57	0,94	16,12	100
Н2	59,39	35,52	94,91	0,97	0,97	1,51	2,89	1,61	0,37	4,87	100

Н1 – нефть Приобского месторождения; Н2 – нефть Тальникового месторождения.

Таблица 2. *Концентрации групп ОВ (мкг/л) и некоторые параметры состава УВ в образцах водных вытяжек из нефтей*

Время	Образцы	Насыщенные						Ароматические				Дибенз-тиофен	Фенолы	Карбазолы	Фталаты
		н-алканы	нафтены+ и-алканы	Σ	*нч/ч*	*CPI*	$\Sigma(C_{10}–C_{22})/\Sigma(C_{23}–C_{35})$	моно-	би-	три-	Σ				
Под пленкой нефти Приобского месторождения															
16 ч	В-Н1	46,2	75,1	121,3	0,8	4,5	1,9	346,5	115,7	1,6	463,8	1,0	41,9	1,3	61,8
48 ч		40,9	18,1	59,0	0,6	2,8	1,8	467,4	164,6	2,2	634,2	1,2	34,4	1,8	62,3
7 сут.		41,5	12,4	54,0	1,0	4,1	1,5	403,7	143,0	2,8	549,6	2,1	36,1	2,4	18,2
14 сут.		23,8	19,5	43,3	1,4	5,0	0,6	397,2	116,5	1,8	515,5	2,3	33,8	2,0	17,1
Под пленкой нефти Тальникового месторождения															
16 ч	В-Н2	49,7	42,1	91,8	0,6	2,8	4,0	43,1	20,9	1,5	65,5	2,1	0,0	0,0	96,1
48 ч		26,1	12,2	38,2	0,7	3,2	1,6	42,9	20,6	1,6	65,1	1,8	0,0	0,0	66,1
7 сут.		21,2	12,5	33,7	1,1	5,3	1,3	52,8	22,1	1,7	76,7	1,7	0,0	0,0	34,5
14 сут.		7,1	9,9	17,0	1,9	10,1	0,4	29,9	17,0	1,2	48,1	1,3	0,0	0,0	17,4
После удаления пленки нефти Приобского месторождения, контактировавшей с водой 45 ч															
16 ч	В*-Н1	13,1	5,3	18,4	1,4	1,9	0,1	132,9	52,8	0,8	186,4	1,2	32,5	0,7	47,0
48 ч		20,8	4,1	24,9	1,2	1,5	0,1	100,9	42,5	0,8	144,2	1,2	35,5	0,8	41,9
7 сут.		15,7	4,6	20,3	0,7	2,0	0,8	40,7	21,1	0,6	62,4	1,2	33,9	0,7	40,7
14 сут.		20,9	55,2	76,1	0,7	2,1	2,0	34,9	8,0	0,3	43,1	1,0	27,5	0,5	21,6

ее удаления (табл. 2) обнаружены серии гомологов насыщенных (н- и изо-алканы, нафтены) УВ. В образцах воды под нефтяными пленками во все контрольные сроки идентифицировался ряд н-алканов $C_{10}–C_{33}$ (рис. 1, А, Б). В образцах воды, выдержанных в течение первых 7 суток после удаления пленки нефти, идентифицировался ряд н-алканов $C_{16}–C_{40}$, а к концу второй недели – ряд $C_{10}–C_{34}$ (рис. 1, В).

При сравнительно близком содержании насыщенных УВ в исходных нефтях, в их водных вытяжках, отобранных из-под нефтяной пленки, имеются различия. Так, из нефти «Н1» растворилось почти в два раза больше нафтеновых и разветвленных алканов и примерно равное количество нормальных (табл. 2). Со временем в образцах водных вытяжек четко видна убыль групп насыщенных УВ, однако темп деградации их различен для образцов, контактировавших с разными нефтями (табл. 2). В образцах «В-Н1» резкая убыль н-алканов происходит только после первой недели контакта с нефтью, вероятно до этого времени идет деградация нафтенов и изо-алканов, в виду их большей концентрации в начальный момент эксперимента. В образцах «В-Н2» резкое снижение концентрации происходило уже с 16 ч контакта. К концу второй недели в образцах водных вытяжек «В-Н1» и «В-Н2» минимизируется разница в содержании нормальных алканов и суммы «нафтены+разветвленные» (табл. 2). К 14 суткам эксперимента содержание суммы насыщенных УВ снизилось более чем в 2,5 раза в образцах «В-Н1» и почти в 5 раз в образцах «В-Н2».

В динамике распределения н-алканов, в образцах водных вытяжек под пленками соответствующих нефтей, отчетливо прослеживается снижение доли низкомолекулярных ($C_{10}–C_{22}$), наименее устойчивых к деградации, гомологов. По соотношениям параметров *нч/ч* и *CPI* хорошо заметно увеличение нечетных гомологов (табл. 2).

Удаление нефтяной пленки с поверхности воды, как следовало ожидать, привело к значительному снижению в воде суммарной концентрации УВ. После 45 ч контакта с нефтью «Н1» и последующего отделения воды от нефтяной пленки, в составе ОВ воды с течением времени выявлены следующие изменения (табл. 2 – образцы «В*-Н1»). В контрольные сроки 48 ч и 14 суток отмечено увеличение суммарной концентрации н-алканов. В период с 16 до 48 ч после удаления пленки нефти заметно преобладают высокомолекулярные гомологи $C_{25}–C_{40}$ (рис. 1, В). В конце первой недели (рис. 1, В

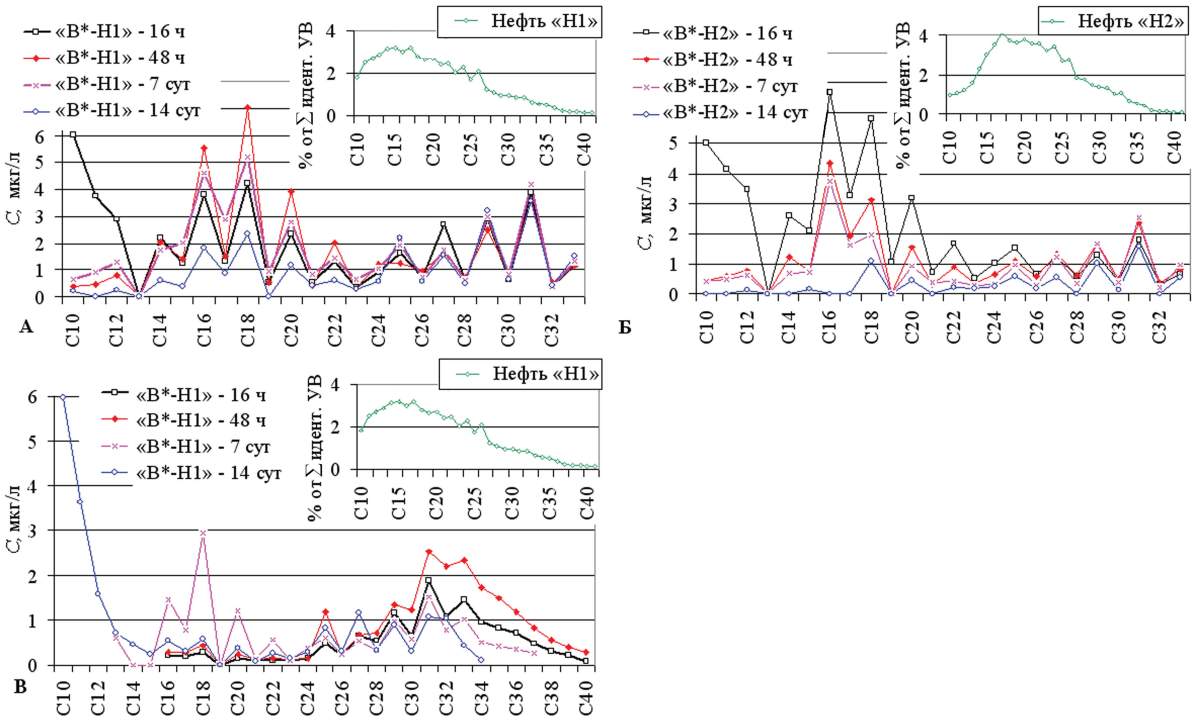


Рис. 1. *Распределение н-алканов в водных вытяжках (А, Б – под пленкой нефти; В – после удаления пленки нефти), а также в соответствующих исходных нефтях*

– «В*-Н1» – 7 сут) зафиксировано резкое увеличение концентрации низкомолекулярных четных н-алканов C_{16}–C_{22}. К концу второй недели (рис. 1, В – «В*-Н1» – 14 сут) отмечено появление еще более легких четных н-алканов C_{10}–C_{12}, в сумме составляющих около половины всех н-алканов. В это же время зафиксирован и резкий всплеск концентраций низкомолекулярных нафтенов и разветвленных алканов (табл. 2).

При значимых изменениях в составе н-алканов на протяжении контрольных сроков, стоит отметить, незначительное колебание индекса CPI (определяемого для высокомолекулярного диапазона н-алканов), чего нельзя сказать о соотношении *нч/ч*. Регистрируемые, в относительно больших количествах, низкомолекулярные н-алканы и нафтены, в конце первой и второй недели экспозиции после удаления пленки нефти, возможно, являются продуктами микробиологических и/или химических процессов при трансформации нефтяных ОВ. Данный факт согласуется с результатами других подобных исследований [3, 4].

Исходные нефти похожи по соотношению групп ароматических УВ (АРУВ), но значительно отличаются по их количеству (табл. 1). Данное обстоятельство во многом определило содержание АРУВ, и возможно других групп УВ, в водных вытяжках. Среди моноароматических УВ во всех водных вытяжках идентифицированы алкилбензолы C_8–C_{10}, инданы и тетралин; среди биароматических – алкилнафталины C_{10}–C_{13}, бифенилы, флуорен, аценафтен; среди триароматических – алкилфенантрены (C_{14}–C_{15}). Установлено, что количество АРУВ соответствуют их растворимости в воде и, в определенных пределах, зависит от содержания в исходной нефти. В образцах воды, взятых непосредственно из-под нефтяной пленки, доля ароматических в сумме УВ за время эксперимента становится преобладающей (табл. 2).

В образцах воды «В-Н1», отбиравшихся непосредственно из-под нефтяной пленки (более ароматической), максимальное содержание всех групп АРУВ приходится на 48 ч контакта, а в образцах «В-Н2» на 7 суток. К концу эксперимента отмечается некоторая убыль (относительно максимума) концентраций всех групп ароматических УВ в образцах водных вытяжек под нефтяной пленкой, но с заметно меньшей интенсивностью, чем насыщенных УВ. По содержанию алкилфенантренов водные вытяжки под пленкой нефтей схожи, хотя в соответствующих нефтях имеется существенное различие в их содержании.

При удалении нефтяной пленки в отстаивавшихся образцах содержание ароматических УВ резко сокращается, уже через 16 ч, более чем в три раза (табл. 2). По истечении двух недель после прекращения контакта с нефтяной пленкой суммарное содержание АРУВ уменьшилось в 14,7 раз. Очевидно, что удаление нефтяной пленки, привело к прекращению «подпитки» воды ароматическими УВ, которая наблюдалась в образцах, отбиравшихся непосредственно из-под пленки нефти (прирост концентраций АРУВ в первые 45 ч для образцов «В-Н1» и в первые 7 суток для образцов «В-Н2»).

Замеченная более медленная деградация парафиновых УВ в вытяжках из нефти «Н1» по сравне-

нию с вытяжками из нефти «Н2», вероятно связана со значительно большей концентрацией АРУВ в первом случае (табл. 2) [4]. Высокая биологическая токсичность АРУВ могла в некоторой степени замедлить деятельность углеводородредуцирующих микроорганизмов. Удаление нефтяной пленки «Н1» приводит к прекращению поступления в воду новых порций токсичных АРУВ, что косвенно активизирует биодеградацию нефтяных компонентов. Всплески концентрации легких парафинов в водной вытяжке после удаления нефтяной пленки, возможно, являются своеобразным откликом на активную биологическую трансформацию ОВ нефтезагрязненной водной среды.

При рассмотрении индивидуального состава АРУВ выявлено, что основная их доля приходится на легкорастворимые и «легкие» компоненты. В групповом составе АРУВ этих серий водных вытяжек, во все контрольные сроки, доминируют моноароматические УВ состава C_8–C_{10}, а длинноцепочные гомологи бензола, изобилующие в исходных нефтях, отсутствуют. Для моно- и биароматических УВ относительное распределение компонентов наблюдаемое в нефтях сохраняется и в их водных вытяжках, и практически не изменяется за время эксперимента, даже после прекращения контакта с нефтяной пленкой. На рис. 2 приведен пример относительного распределения моно- и биароматических УВ, в порядке их хроматографического разделения для нефти «Н1» и ее водных вытяжек. Аналогичное обстоятельство выявлено и для серии образцов с нефтью «Н2».

В литературных источниках нет информации, что рассмотренные АРУВ в таком «нефтяном» составе и распределении могут встречаться в незагрязненных водных объектах. Присутствие в составе нефтей множества алкилированных гомологов, в основном объясняется их образованием под действием высоких температур и давлений при нефтеобразовании в недрах [5]. Для незагрязненных объектов окружающей среды эти соединения нехарактерны. Наличие в водных объектах «нефтяного» набора данных соединений будет выступать прямым индикатором контакта нефти с водой, техногенного (загрязнение) или природного (например, высачивание из недр) характера. Однако эти соединения также подвержены деградации факторами окружающей среды, ограничивающей время их пребывания и возможность обнаружения.

Среди специфичных нефтяных гетеросоединений в водных вытяжках нефти «Н1» идентифицирован широкий спектр фенолов, крезолы, дибензтиофен, фталаты (эфиры ортофталевой кислоты) (табл. 2). В водных вытяжках нефти «Н2» обнаружены только фталаты и дибензтиофен. В исходных нефтях эти соединения не определялись, ввиду того, что их концентрации в нефти, в сравнении с УВ очень малы, и их идентификация требует специальной подготовки нефтяных образцов. Однако регистрация данных соединений в водных вытяжках нами однозначно связывается с их переходом из нефти (кроме некоторых фенолов).

Фталаты, идентифицированные во всех образцах воды, как под нефтяной пленкой, так и после ее удаления, представлены двумя компонентами, в сумме составляющими существенную долю идентифицированных компонентов, сопоставимую с долей переходящих в воду насыщенных УВ. В динамике содержания фталатов отмечена явная их убыль, уже с первых контрольных сроков. Стоит отметить, что в образцах «В-Н1» под нефтяной пленкой убыль фталатов произошла существеннее, чем в образцах отстаивавшихся после удаления пленки нефти. Присутствие фталатов в образцах воды, по всей видимости, связано с их растворением из нефти в первые часы контакта, так как в последующие сроки наблюдается только их убыль. Однако нельзя забывать, что фталаты в объектах

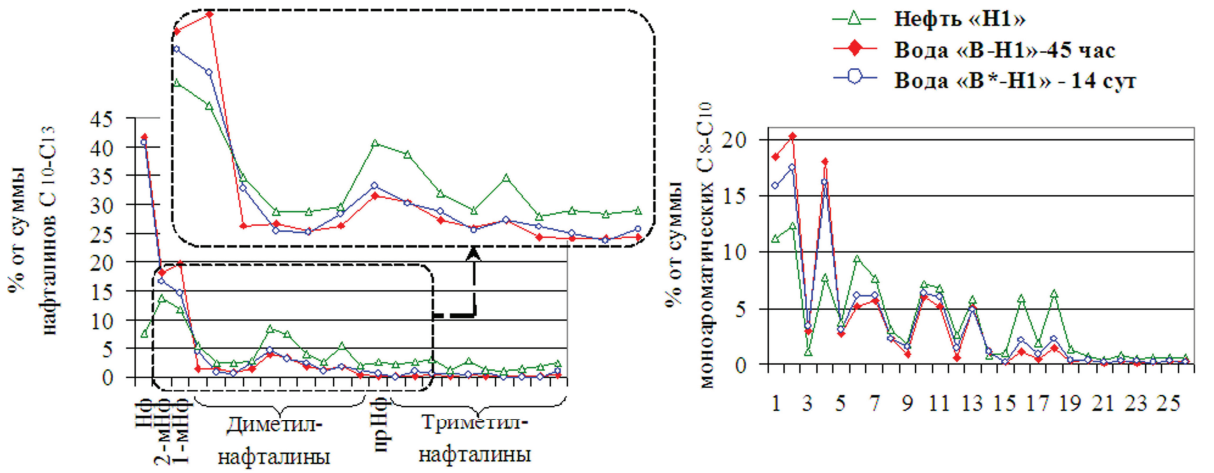


Рис. 2. *Распределение биароматических (слева) и моноароматических (справа) УВ в нефти и ее водных вытяжках. На левом рисунке по ОХ: Нф – нафталин; 2-мНФ – 2-метилнафталин; 1-мНФ – 1-метилнафталин-, прНФ – пропилнафталин. На правом рисунке по ОХ: 1) [этилбензол]; 2–4) [м-, п-, о-ксилолы]; 5) [изопропилбензол]; 6) [н-пропилбензол]; 7, 8, 10) [метил-этилбензолы]; 9, 11, 13) [триметилбензолы]; 12) [метил-изопропилбензол]; 14) [индан]; 15–17) [диэтилбензолы]; 16–18) [метил-н-пропилбензолы]; 19–22) [диметил-этилбензолы]; 23–25) [тетраметилбензолы]; 26) [тетралин]*

окружающей среды достаточно широко распространены как техногенные органические загрязнители с множеством отличных от нефтяного загрязнения источников [6].

Отдельного внимания заслуживают фенолы, обнаруженные в образцах водных вытяжек «В-Н1», как под нефтяной пленкой, так и после ее удаления. Суммарное их содержание в данном эксперименте сравнимо с содержанием переходящих в воду н-алканов. По литературным данным, в нефтях содержание фенолов может составлять сотые доли процента [7]. В нефтях Западной Сибири установлено присутствие фенола, крезолов, ди-, три-метилфенолов, а также их изомеров [7]. В нашем эксперименте в водных вытяжках идентифицированы ди-, и триметил фенолы, тимол, этилметил- и диэилфенолы, метил- и этилпропилфенол. Основная доля суммы фенолов на протяжении всего срока эксперимента, приходится на один из представителей триметилфенолов. В данных условиях эксперимента отмечена слабая убыль суммарной концентрации фенолов со временем.

После удаления нефтяной пленки в период с 7 до 14 суток отмечено появление более высокомолекулярных фенолов (например, фенилэтилфенол и т. п.) на фоне общего снижения их суммарной концентрации. Фенолы часто относят к промежуточным продуктам микробиологической и химической трансформации нефтяных ОВ [2, 3], чем, возможно, объясняется появление в водных вытяжках высокомолекулярных фенолов. В целом, в окружающей среде фенолы, как и УВ, могут иметь как биогенное, так техногенное происхождение [7]. Источником биогенных фенолов служит растительный и животный мир, при ведущей роли растительного. Техногенные фенолы являются продуктами переработки органических природных ископаемых (торфа, каменного угля, окисленного угля, сапропелей, нефтей), растительного сырья, а также промышленного синтеза. Тем самым, фенолы, в виду их хорошей растворимости в воде и присутствием во многих нефтях в широком составе, могут использоваться как дополнительный показатель нефтяного загрязнения водного объекта, при увеличении их содержания относительно фоновых значений исследуемых объектов.

В водных вытяжках «В-Н1» идентифицированы такие специфичные гетеросоединения как карбазолы (метил и диметикарбазолы) и дибензтиофен. В образцах, отобранных непосредственно из-под нефтяной пленки, в течение первой недели отмечено некоторое увеличение содержания карбазолов. Однако после удаления нефтяной пленки значимая убыль их отмечена только в первые 16 ч выдерживания. Дибензотиофен обнаружен как в вытяжках «В-Н1», так и «В-Н2», в сопоставимых количествах. В образцах «В-Н1» (из-под пленки) прирост концентрации дибензтиофена отмечен на протяжении 14 суток, а в образцах «В-Н2» уже с 16 ч происходит его убыль. По всей видимости, динамика содержания дибензтиофена в образцах водных вытяжек обусловлена составом исходных нефтей, возможно, количеством смолистых соединений. При удалении нефтяной пленки прирост концентрации, обеспечиваемый нефтяной пленкой, прекращается, с тенденцией к убыли.

Заключение

Даже за относительно короткое время контактирования с нефтью, водная среда успевает значительно обогатиться характерным комплексом растворившихся нефтяных компонентов, свидетельствующих о факте ее нефтяного загрязнения. Рассмотренные группы УВ и гетеросоединений уверенно идентифицировались на протяжении 14 суток как в образцах под нефтяной пленкой, так и после ее удаления. В образцах воды под нефтяной пленкой в составе УВ фракции с первых часов наблюдается убыль насыщенных УВ, в большей степени низкомолекулярных. Напротив, содержание АРУВ увеличивается до определенного времени в зависимости от состава исходной нефти и со временем становится преобладающим. Однако при удалении нефтяной пленки, преобладание АРУВ сменяется быстрой их деградацией, за счет отсутствия притока из нефтяной пленки. Отличительной особенностью процесса растворения и трансформации нефтяных ОВ в воде является образование легких четных н-алканов в противоположность н-алканам высшей растительности, которые зачастую доминируют в составе биогенных УВ водоемов и представлены нечетными высокомолекулярными гомологами.

По результатам модельного эксперимента с учетом современных представлений о составе УВ естественного (биогенного) происхождения, надежным индикатором нефтяного загрязнения водного объекта будут являться АРУВ: алкилбензолы (C_8–C_{10}), алкилнафталины (C_{10}–C_{13}), алкилфенантрены (C_{14}–C_{15}), в установленном выше составе и распределении, мало изменяющихся со временем даже после удаления нефтяной пленки. Изучение состава гетероатомных органических компонентов нефтезагрязненной водной среды позволило определить дополнительные соединения-индикаторы, такие как фенолы, карбазолы и дибензтиофены, обнаружение которых совместно с углеводородными индикаторами существенно повышает достоверность установления факта нефтяного загрязнения. Необходимо отметить высокую устойчивость дибензтиофена и карбазолов в составе нефтезагрязненной воды, даже после удаления нефтяной пленки. Время пребывания предложенных индикаторов нефтяного загрязнения в водоеме, вероятно, определяется составом и количеством загрязнителя в совокупности с химическими, биологическими и природно-климатическими особенностями исследуемого водного объекта и может быть оценено в дальнейших более длительных экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульков М.Г., Артамонов В.Ю., Коржов Ю.В., Углев В.В. Индивидуальные органические соединения нефти как индикаторы техногенного нефтяного загрязнения водной среды // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 195–200.
2. Никаноров А.М., Страдомская А.Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем. – Ростов-на-Дону: НОК, 2008. – 222 с.
3. Одинцова Т.А. Разработка технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2010. – 22 с.
4. Atlas R.M. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective // Microbiological reviews. – 1981. – V. 45. – № 1. – P. 180–209.
5. Петров А.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 264 с.
6. Азарова И.Н. ВЭЖХ метод определения ди(2-этилгексил)фталата для изучения его поведения в экосистеме озера Байкал: дис. ... канд. хим. наук. – Иркутск, 2003. – 123 с.
7. Елин Е.С. Фенольные соединения в биосфере. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 392 с.

Поступила 01.06.2011 г.

УДК 378:56(571.16)(092)

МИХАИЛ ЭРАСТОВИЧ ЯНИШЕВСКИЙ – ОСНОВАТЕЛЬ КАФЕДРЫ ПАЛЕОНТОЛОГИИ В ТОМСКОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

И.В. Рычкова, Э.Д. Рябчикова

Томский политехнический университет
E-mail: irina.rychkova@mail.ru

В 2011 г. исполнилось 140 лет со дня рождения основателя кафедры палеонтологии в Томском технологическом институте (Томском политехническом университете) выдающегося палеонтолога Михаила Эрастовича Янишевского, а в 2012 г. – 110 лет со дня основания этой кафедры.

Ключевые слова:
М.Э. Янишевский, палеонтология, фауна, брахиоподы, мшанки.

Key words:
M.E. Janishevsky, paleontology, fauna, brachiopoda, bryozoa.

Михаил Эрастович Янишевский (рис. 1) внес огромный вклад в становление и развитие палеонтологии в нашей стране. Он родился 2 (14) декабря 1871 г. в семье профессора Казанского университета Эраста Петровича (1829–1906). Имел двух братьев: Алексея Эрастовича (1873–1936) – невропатолога, психиатра, психолога, профессора медицинского факультета Софийского университета, эмигрировавшего из России в 1920 г. и Дмитрия Эрастовича (1875–1944) – ботаника, профессора.

В 1889 г. Михаил Эрастович с золотой медалью окончил Казанскую гимназию и поступил на естественное отделение Казанского университета. Уже в студенчестве проявлял интерес к научной работе в области геологии. Написанная в студенчестве работа «Описание кристаллов топаза и берилла, хранящихся в минералогическом кабинете Казанского университета» была отмечена золотой медалью. После завершения в 1893 г. университетского курса отправился отбывать воинскую повинность. С 1893 по 1894 гг. проходил воинскую службу в качестве вольноопределяющегося I разряда в Ветлужском резервном батальоне. Возвратившись в 1895 г. к гражданской жизни, М.Э. Янишевский стал «профессорским стипендиатом» (т. е. аспирантом) на кафедре геологии и минералогии Казанского университета, возглавлявшейся видным палеонтологом А.А. Штукенбергом. С этого времени начинается более чем полувековая научно-педагогическая деятельность М.Э. Янишевского. В 1897 г. он сдал магистерский экзамен и был назначен сверхштатным хранителем геологического кабинета Казанского университета. В 1989 г. по прочтении двух пробных лекций был зачислен приват-доцентом и начал читать курс палеонтологии для студентов-естественников.

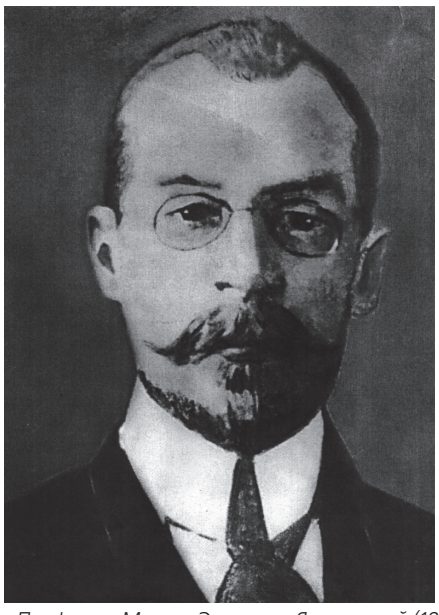


Рис. 1. *Профессор Михаил Эрастович Янишевский (1871–1949)*



Рис. 2. *Палеонтологический кабинет (ныне ауд. 104, 1-го учебного корпуса ТПУ, ул. Советская, 73)*

В 1895–1900 гг. объектом особого внимания М.Э. Янишевского стала фауна каменноугольных отложений Урала, которой в 1900 г. он посвятил свой фундаментальный труд «Фауна каменноугольного известняка, выступающего по р. Шартымке на восточном склоне Урала». В этой работе он дал описание 328 видов (в том числе 60 новых) различных групп беспозвоночных. Проведя биостратиграфический анализ фауны, М.Э. Янишевский сумел впервые верно обосновать раннекаменноугольный возраст исследованных им гониатитовых слоев восточного склона Южного Урала, хотя все предшественники Михаила Эрастовича, начиная с Мурчисона, относили гониатитовые слои к верхнему отделу каменноугольной системы. Эту работу, ставшую впоследствии классической, он успешно защитил в том же 1900 г. в качестве диссертации на ученую степень магистра минералогии и геогнозии.

В 1902 г. М.Э. Янишевский был приглашен В.А. Обручевым для создания кафедры палеонтологии в Томском технологическом институте. Много сил и энергии пришлось затратить на создание первого в Сибири палеонтологического кабинета (рис. 2).

Для обеспечения учебного процесса и оснащения его всем необходимым материалом, М.Э. Янишевский в течение 1902–1904 гг. знакомился с методикой преподавания палеонтологии в вузах Европы. В гг. Бонне и Берлине Михаил Эрастович заказал в специализированной фирме Ф. Кранца многотысячные коллекции окаменелостей, которые и по сей день украшают палеонтологический музей ТПУ и являются основой современной экспозиции. Образцы этой коллекции многие десятилетия служат необходимым учебным материалом для занятий студентов-геологов. Михаилу Эрастовичу удалось также оснастить кабинет палеонтологии первоклассной библиотекой на русском, немецком и французском языках. В это же время ученый совершает множество полевых экскурсий по Западной Сибири и Европейской России, а также пять многомесячных заграничных поездок. М.Э. Янишевский принимает участие в работе Международных геологических конгрессов в Вене (1903 г.), Мексике (1906 г.), Стокгольме (1910 г.).

В 1904 г. во время экскурсий в Губерлинских горах (южный Урал) М.Э. Янишевский заинтересовался локальным выходом известняков, обнажающихся в 5 км севернее от поселка Хабарное на р. Урал. Известняк привлек внимание ученого значительным богатством органических остатков, отличающихся при этом хорошей сохранностью. В 1907 гг. он организовал экспедицию на Урал для дальнейшего изучения этих отложений. В работе по сбору окаменелостей ему помогали студенты Томского технологического института Н.М. Попов, братья Н.Г. и М.Г. Поповы. По набору ископаемой фауны М.Э. Янишевским был определен возраст этих отложений как раннекаменноугольный. Им впервые в России был обнаружен коралл рода Pentaphyllum.

В 1910 г. М.Э. Янишевский защитил в Казанском университете докторскую диссертацию на тему: «Нижнекаменноугольный известняк около поселка Хабарного Орского уезда, Оренбургской губернии», которую затем опубликовал как монографию (рис. 3).

В 1908 г. он совершил экспедицию по Сибири для изучения условий местонахождения различных палеонтологических остатков и для осмотра музеев гг. Красноярска, Минусинска, Иркутска. В 1909 г.

со студентами обследовал берега р. Томи от Кузнецка до Томска.


Палеонт. каб. № 6.90.

Изъ палеонтологическаго кабинета Томскаго Технологическаго Института.

М. Янишевскій.

НИЖНЕ-КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ ИЗВЕСТНЯКЪ

ОКОЛО

поселка Хабарнаго Орскаго уѣзда, Оренбургской губ.

Съ 21 таблицей рисунков. и 1 картой.

Aus dem Palaeontologischen Kabinet des Technologischen Instituts zu Tomsk.

M. Janischewsky.

UNTER-KARBON-KALK

NEBEN

Chabarny im Kreise Orsk Oreuburg-Gouvernements.

Mit 21 Tafeln und 1 Karte.

ТОМСКЪ.

Типо-литография Сибирскаго Т—ва печатнаго дѣла, уг. Дворянской ул. и Ямск. пер. соб. д.

1910.

Рис. 3. *Титульный лист монографии М.Э. Янишевского*

В 1910 г. Янишевский назначается профессором кафедры палеонтологии Томского технологического института. Примечательно то, что в это время на геологическом отделении было всего 3 профессора: А.М. Зайцев, А.В. Лаврский и М.Э. Янишевский.

В 1911 г. М.Э. Янишевский изучает фауну из обнажений правого берега р. Томи. В самом восточном обнажении в Лагерном саду в голубовато-серых глинистых сланцах он обнаружил два фаунистических горизонта, которые назвал «брахиоподовый слой» и «мшанковый слой» по преобладанию в них соответствующей фауны (рис. 4).

Исследователями разных лет делались попытки оценить возраст этих пород как силурийский, девонский или каменноугольный, но только М.Э. Янишевскому удалось по находкам брахиопод *Spiriferina octoplicata* Sow. и мшанок *Fenestella plebeja* M'Coy. однозначно определить возраст отложений как раннекаменноугольный. Здесь же им были описаны голотипы брахиопод, мшанок и моллюсков (рис. 5–8, табл.). В мшанковом горизонте был найден хвостовой щит небольших размеров, принадлежащий роду *Phillipsia* sp., представителю последнего семейства трилобитов. Эти беспозвоночные животные обитали на дне теплого мелководного морского бассейна, занимавшего территорию г. Томска и его окрестности в раннекаменноугольное время 345...325 млн л назад.

В одном из обнажений в Лагерном саду, в рыжих песчаниках М.Э. Янишевским были обнаружены и описаны ископаемые остатки растений: *Pinus* sp., *Taxodium distichum miocenum* Heer., *Myrica dryandroides* Ung., *Populus balsamoides* Goepp., *Juglans acu-*



Рис. 4. *Обнажение в Лагерном саду, г. Томск, в котором обнаружены «брахиоподовый слой» и «мшанковый слой»*

minate A.Br., *J. densinervis* Schm., *Carpinus grandis* Unger., *Corylus* cf. *insignis* Heer, *Fagus* cf. *antipofii* Heer, *Quercus* cf. *nimrodi* Unger, *Q. groenlandica* Heer, *Liquidambar europaeum* A.Br., *Nyssa* sp., *Diospyros brachysepala* A. Br., которые он определил как миоценовые (рис. 9). Вся обнаруженная флора является показателем теплого климата, который установился на территории г. Томска в позднем палеогене 34...23 млн л назад. В 1915 г. по итогам своих исследований он опубликовал 2 монографии (рис. 10).

Таблица. *Фауна каменноугольного возраста из Лагерного сада, обнаруженная и описанная М.Э. Янишевским*

	Фауна	Голотипы	Многочисленные находки
Брахиоподы	*Schuhertella tomskiensis* Jan.	+	+
	Spiriferina octoplicata n.var. Jan.	+	+
	Retzia radialis Phill.	–	единичные
	Spirifer sibiricus Jan.	+	+
	Rhynchonella pleurodon Phill.	–	единичные
	Productus semiretuculatus Mart.	–	+
	P. granulosus Phill.	–	единичные
	P. punctatus Mart.	–	единичные
	Spirifer princeps M'Coy	–	единичные
	Athyris lamellosa L'Eveil.	–	+
Мшанки	*Fenestella plebeja* M'Coy	–	единичные
	Polypora sibirica Jan.	+	единичные
	P. porosa Eichw.	–	единичные
Моллюски	*Sanguinolites tricostatus* Portl.	–	единичные
	Edmondia laminata Phill.	–	единичные
	Aviculopecten tabulatus M'Coy	–	единичные
	A.plicatus Sow.	–	единичные
	A. teniconcentricus Jan.	+	единичные
	Pinna flabelliformis Mart.	–	единичные
	Palaeolima sp.	–	единичные
	Modiolopsis sp.	–	единичные
	P. koninckianus Jan.	–	единичные
	Pleurotomaria sp.	–	единичные
	Naticopsis sp.	–	единичные
	Orthoceras sp.	–	единичные
	Goniatites sp.	–	единичные



Рис. 5. *Spiriferina octoplicata n.var. concentrica Jan.*

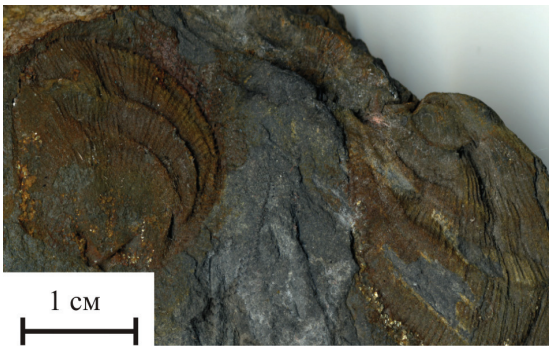


Рис. 6. *Schuhertella tomskiensis Jan.*



Рис. 7. *Spirifer sibiricus Jan.*

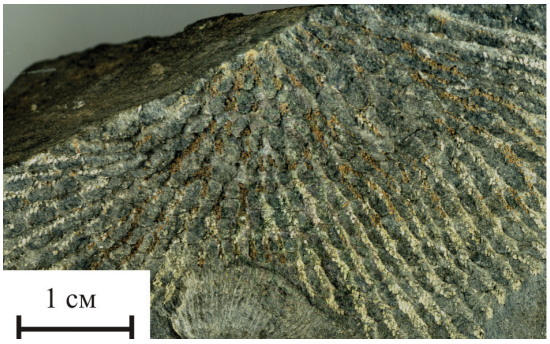


Рис. 8. *Polypora sibirica Jan.*

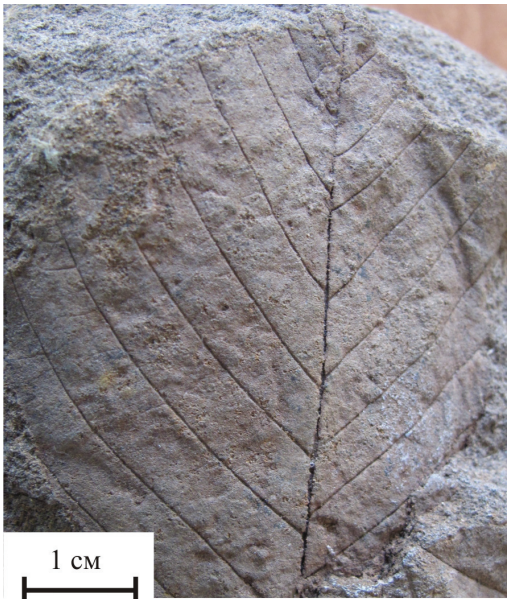


Рис. 9. *Carpinus grandis Unger.*

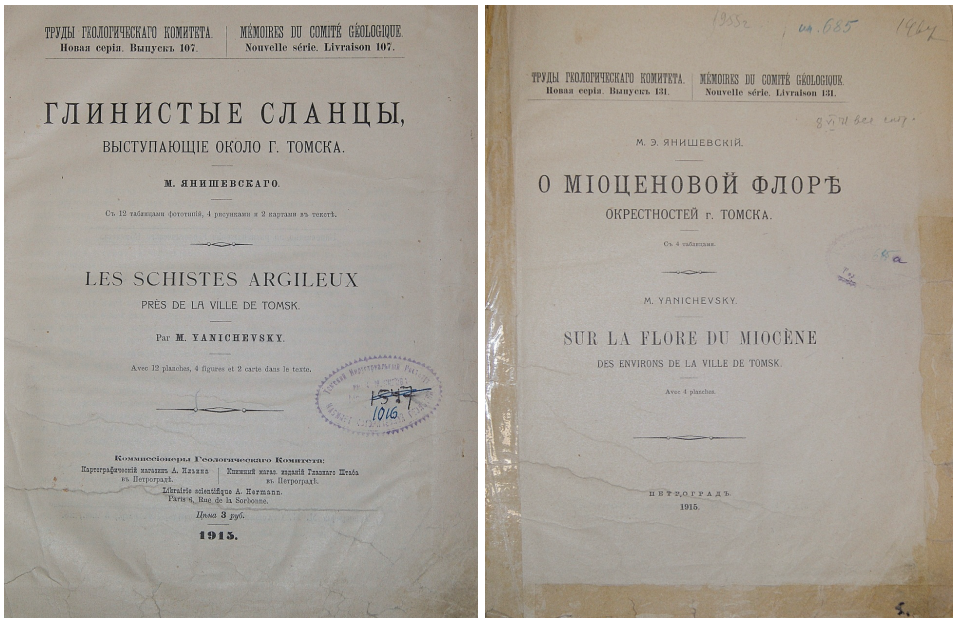


Рис. 10. *Монографии М.Э. Янишевского 1915 г.*

Все время пребывания М.Э. Янишевского с ним в г. Томске находился его ассистент и старший лаборант кафедры палеонтологии Петр Александрович Казанский, прибывший в г. Томск 01.06.1903 г. П.А. Казанский занимался обработкой собранных им материалов из мезозойских отложений нижней Волги, Дагестана, Урала и Западной Сибири. В 1909 г. совместно с М.Э. Янишевским он опубликовал перевод учебника Г. Штейнмана «Введение в палеонтологию».

Уже в сентябре 1911 г. профессорская деятельность М.Э. Янишевского в г. Томске неожиданно прерывается из-за оппозиционного отношения к царскому правительству. В пятую годовщину событий 9 января 1905 г. Михаил Эрастович выступил на Совете профессоров с предложением почтить память погибших. Вскоре после этого выступления ему было предложено «...незамедлительно подать в отставку». В 21.09.1911 г. по приказу министра просвещения Кассо он уволен из института по политическим мотивам в числе других профессоров (в их числе был и академик В.А. Обручев).

После этого М.Э. Янишевский переезжает в Санкт-Петербург. С 1912 по 1932 гг. работает в Геологическом комитете – заведует секцией Европейской России, руководит работой Четвертичной комиссии, принимает деятельное участие в создании Музея Геологического комитета, заведует отделом геологической съемки в Ленинградском отделении Геологического комитета (возглавляет крупные работы по детальному геологическому изучению Ленинградской области и ее полезным ископаемым). После ухода из штата Ленинградского отделения Геолкома он не прекращает связь с производственными организациями, до последнего является консультантом ряда геологических организаций (Ленинградское геологическое управление, центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт, Нефтяной институт и др.).

В 1915 г. возобновилась педагогическая деятельность Михаила Эрастовича; в этом году он читал курс геологии на курсах П.Ф. Лесгафта (ныне Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург). С 1916 г. он – профессор Петроградских высших женских курсов, где читает палеонтологию и историческую геологию, а в Психо-неврологическом институте читает палеонтологию.

В 1919 г. М.Э. Янишевский создает кафедру палеонтологии в Петроградском (Ленинградском) университете и до 1949 г. – профессор этой кафедры. На кафедре палеонтологии развивалось три направления: палеонтология беспозвоночных, палеонтология позвоночных, палеоботаника. Отделом позвоночных руководил профессор Ю.А Орлов, отделом палеоботаники – А.Н. Криштофович, отдел беспозвоночных возглавил сам М.Э. Янишевский. В течение 30 лет Михаил Эрастович бессменно руководил созданной им кафедрой. За эти годы он подготовил несколько поколений палеонтологов и стратиграфов, среди которых много видных ученых (Б.С. Соколов, А.П. Ротай, Д.Л. Степанов, Л.Б. Рухин и многие доктора и кандидаты наук). Характерной особенностью школы ленинградских палеонтологов, подготовленных М.Э. Янишевским, является преобладание стратиграфического направления в палеонтологических исследованиях, тесная связь палеонтологии с практикой геологоразведочного дела.

В течение ряда лет Михаил Эрастович был директором Научно-исследовательского института земной коры при Ленинградском университете.

По его инициативе здесь же возобновила работу палеонтологическая лаборатория. Деятельное участие он также принимал в работе Ленинградского общества естествоиспытателей.

Большое внимание ученый уделял популяризаторской деятельности – читал публичные лекции, проводил экскурсии. Научное наследие его велико: более 120 научных трудов, среди которых ряд крупных монографий и статей.

Многообразие геологических работ М.Э. Янишевского можно разделить на три группы, соответствующие основным этапам его научной деятельности. Первая группа представляет работы по Поволжью, Притиманья, Южного Урала, Мугоджар. Во вторую группу входят его исследования по Западной Сибири, окрестностям г.Томска, сыгравшие решающую роль в разработке стратиграфии этого района, Калбинского хребта и южного Алтая. Главной заслугой Михаила Эрастовича как геолога являются многолетние (с 1919 г.) исследования по геологическому строению окрестностей Ленинграда. Им была разработана стратиграфия всей осадочной толщи от кембрия до четвертичных отложений Ленинградской области, составлены подробные геологические карты и др. Велико значение этих работ для поисков углей, бокситов и огнеупорных глин.

Широк стратиграфический и географический диапазон палеонтологических работ Михаила Эрастовича. Наряду с изученными им разнообразными фаунами всех систем палеозоя, выдающееся значение и признание мирового научного сообщества получили его исследования по фауне и стратиграфии карбона. Признание авторитета М.Э. Янишевского как главы русских биостратиграфов-карбонистов проявилось в поручении ему составления и редактирования сводки по каменноугольным отложениям СССР для Международного геологического конгресса в Геерлене в 1927 г.

Близко знавшие Михаила Эрастовича люди, отмечали исключительную разносторонность ученого-исследователя, а также любимого студенческой молодежью профессора. Он был добрый, жизнерадостный, благожелательный, доступный для каждого, кто нуждался в его помощи. Личное обаяние и авторитет нередко определяли выбор студентами палеонтологической специальности. Он любил музыку, сам хорошо играл на пианино и скрипке, увлекался спортом, особенно конькобежным. Чуткий и отзывчивый к другим Михаил Эрастович был требователен к себе. Практически до последних дней жизни, героически борясь с болезнью, он продолжал читать лекции и интересовался жизнью кафедры и университета.

Михаил Эрастович стал одним из учредителей и Почетным членом Всероссийского палеонтологического общества. В разные годы он был удостоен наград: Ордена Святой Анны 3 степени (1904 г.), Заслуженного деятеля науки РСФСР (1945 г.), Лауреата Сталинской премии (1947 г.), Ордена Трудового Красного Знамени. В память о нём в I учебном корпусе ТПУ установлена мемориальная доска.

Монографические палеонтологические коллекции нижнего карбона, собранные и описанные М.Э. Янишевским, хранятся ныне в палеонтологическом кабинете ТПУ. Монографии и статьи М.Э. Янишевского широко используются преподавателями, научными сотрудниками и студентами, проходящими геологическую практику в окрестностях г. Томска. Михаил Эрастович является носителем лучших традиций классиков отечественной геологии и одним из пионеров в деле распространения палеонтологических знаний, в подготовке кадров палеонтологов в нашей стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янишевский М.Э. Отчет (предварительный) о командировке в Мугоджарские и Губерлинские горы // Известия Томского Технологического Института. 1905. URL: http://portal.tpu.ru/izvestiya/archiv?articlesfor=167441 (дата обращения: 01.10.2011).
2. Янишевский М. Э. Краткий отчет о летних экскурсиях 1907 и 1908 г. // Известия Томского Технологического Института. 1909. URL: http://portal.tpu.ru/izvestiya/archiv? articlesfor=176179 (дата обращения: 01.10.2011).
3. Янишевский М. Э. Фауна нижне-каменноугольного известняка около поселка Хабарного, Орского уезда, Оренбургской губ // Известия Томского Технологического Института. 1910. URL: http://portal.tpu.ru/izvestiya/archiv?articlesfor=180911 (дата обращения: 01.10.2011).
4. Янишевский М.Э. Нижнекаменноугольный известняк около поселка Хабарного Орского уезда, Оренбургской губернии. – Томск, 1910. – 301 с.
5. Янишевский М. Э. Предварительный отчет о студенческой экскурсии по р. Томи в 1909 г. // Известия Томского Технологического Института. 1911. URL: http://portal.tpu.ru/izvestiya/archiv?articlesfor=188924 (дата обращения: 01.10.2011).
6. Янишевский М.Э. Глинистые сланцы, выступающие около г. Томска / Труды Геологического комитета. Новая серия. – Томск, 1915. – Вып. 107. – 96 с.
7. Янишевский М.Э. О миоценовой флоре, встречающейся в окрестностях г. Томска / Труды Геологического комитета. Новая серия. – Томск, 1915. – Вып. 131. – 13 с.
8. Степанов Д.Л. Памяти М.Э. Янишевского // Ученые записки ЛГУ. – 1953. – Сер. геол. наук. – Вып. 3. – № 159.– С. 3–11.
9. Балашов З.Г. М.Э. Янишевский и палеонтологические работы в Ленинградском университете // Отечественная палеонтология за сто лет (1870–1970 гг.). Труды XVI сессии ВПО. – Л., 1977. – С. 124–132.
10. Гудымович С.С., Рычкова И.В., Рябчикова Э.Д. Геологическое строение окрестностей г. Томска (территории прохождения геологической практики). – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 83 с.

Поступила 08.10.2011 г.

УДК [548.2+616.6]:378.662(571.16)

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО БИОМИНЕРАЛОГИИ И УРОЛОГИИ В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

А.К. Полиенко, О.А. Севостьянова

Томский политехнический университет
E-mail: polienkoa@yandex.ru

Изложена история зарождения и развития научных исследований по биологической минералогии и урологии в Томском политехническом институте (университете), проводимых совместно с урологами Сибирского государственного медицинского университета. Показано участие минералогов и урологов в планировании и выполнении научных исследований по изучению органоминеральных агрегатов (уролитов), формирующихся в мочевыделительной системе человека. Отмечены ведущие учёные в области биологической минералогии, а также специалисты-урологи, участвующие в выполнении научных исследований по изучению мочевых камней. Определены перспективы развития совместной деятельности минералогов и урологов.

Ключевые слова:
Биоминералогия, урология, уролитиаз, мочевые камни.

Key words:
Biomineralogy, urology, urolithias, urinary stones.

Научная проблема по исследованию мочевых камней является дальнейшим развитием исследований Томской научно-образовательной школы, разрабатывающей научные основы изучения абиогенных и биогенных образований в живой и неживой природе.

Поводом для написания этой статьи послужил факт многолетнего научного сотрудничества двух, казалось бы, несовместимых наук – минералогии (её генетической разновидности – биологической минералогии) и урологии.

Объектами изучения биологической минералогии являются образования, созданные живым организмом или при участии живого организма и состоящие из органического и минерального веществ. Термин «биоминералогия» в отечественной литературе появился в 1976 г. в работе А.А. Кораго «Жемчуг Северо-Запада СССР» [1], где были сформулированы основные особенности объектов биоминералогии. В зарубежной литературе этот термин начал использоваться несколько раньше, в 1973 г., английским исследователем Д. Мак-Конелом [2], а в 1983 г. опубликована небольшая научно-популярная книга Б.И. Сребродольского «Биологическая минералогия» [3]. Основоположником отечественной биологической минералогии с полным основанием считается А.А. Кораго.

В Томском политехническом университете научные исследования по биологической минералогии имеют более чем тридцатилетнюю историю.

Начало исследованиям в области минералогии и урологии в ТПИ было положено в 1978 г. на кафедре минералогии и петрографии геолого-разведочного факультета совместно с урологами Сибирского государственного медицинского института. В качестве первой попытки выполнено определение состава и строения нескольких мочевых камней под руководством старшего научного сотрудника кафедры В.А. Ермолаева (фото 1). В 1979 г. подготовлена и защищена дипломная студенческая работа, посвящённая изучению минерального состава и строения мочевых камней. Она докладывалась на студенческих конференциях в Томском политехническом институте, была отмечена премией и почетной грамотой ТПИ.



Фото 1. *Старший научный сотрудник, к.г.-м.н. Виктор Александрович Ермолаев (1997)*

В 1981 г. старший инженер (руководитель) минералогического музея геологоразведочного факультета ТПИ А.К. Полиенко приступил к изучению онтогении мочевых камней. В этом же году он был зачислен в заочную аспирантуру по специальности «Минералогия и кристаллография». Кафедрой минералогии и петрографии в то время заведовал профессор Александр Григорьевич Бакиров (фото 2). В дальнейшем профессор А.Г. Бакиров в составе коллектива ученых геологоразведочного факультета принимал активное участие в исследовании онтогении биоминеральных образований (уролитов) в мочевой системе человека.



Фото 2. *Профессор, д.г.-м.н. Александр Григорьевич Бакиров (07.02.1915–28.12.2008 гг.)*

Научным руководителем аспиранта А.К. Полиенко был сначала утверждён к.г.-м.н. В.А. Ермолаев, а затем заведующий кафедрой профессор Александр Григорьевич Бакиров.

В последующие годы (после 1992 г.) к изучению биоминеральных образований в организме человека подключился заведующий кафедрой минералогии и петрографии профессор Генрих Владимирович Шубин (фото 3). По итогам этих исследований была издана монография по биоминеральным образованиям – «Онтогения уролитов» (А.К. Полиенко, Г.В. Шубин, В.А. Ермолаев, 1997 г.) [4].

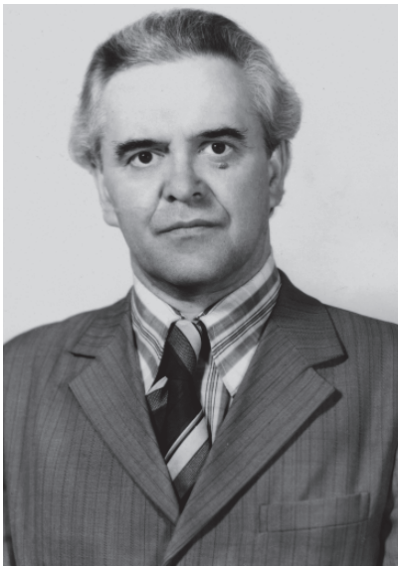


Фото 3. *Профессор, д.г.-м.н. Генрих Владимирович Шубин (18.12.1930–26.11.2000 гг.)*

Материалом для исследований послужили мочевые камни, извлекаемые в результате хирургических операций в урологических отделениях городских больниц. Первые образцы мочевых камней были получены в урологическом отделении Томской городской больницы № 3. К инициативе минералогов-политехников по изучению мочевых камней с пониманием отнеслась Надежда Иннокентьевна Шипулина, врач-хирург, зав. урологическим отделением Томской городской больницы № 3, отличник здравоохранения. Ведущим хирургом в отделении работал Юрий Никифорович Жуков, врач высшей категории. По результатам первых исследований мочевых камней совместно с урологами были опубликованы статьи [5, 6].

Выполнение научных исследований было поддержано медицинской общественностью города. Значительную поддержку совместным исследованиям оказал И.С. Петров, бывший в то время главным урологом Томского облздравотдела. Ранее, в ноябре 1965 г., Иван Степанович выступил с докладом «Географическая распространённость нефролитиаза на территории Томской области» на научном совещании по проблемам медицинской географии [7]. Уже тогда высокий уровень заболеваемости мочекаменной болезнью находился в центре внимания урологов.

Заведующий кафедрой микробиологии Томского медицинского института академик Академии медицинских наук СССР Н.В. Васильев в 1986 г. высоко оценил исследования, направленные на изучение мочевых камней. Им отмечалось, что научная работа выполняется на стыке, казалось бы, весьма отдалённых друг от друга отраслей знаний – минералогии, кристаллографии и медицины.

Первое сообщение о проводящихся исследованиях мочевых камней А.К. Полиенко сделал в 1984 г. на заседании научного семинара геологоразведочного факультета ТПИ. Затем он выступил с предварительными результатами исследований на научном семинаре урологов в Томском медицинском институте. И в 1985 г. на Международном минералогическом семинаре в Институте геологии УрО АН СССР (г. Сыктывкар) специалисты-минералоги из ряда регионов Советского Союза познакомились с научными достижениями томичей-политехников в области онтогении мочевых камней. Работа была выслушана с интересом, одобрена, были высказаны рекомендации по дальнейшим исследованиям. А в мае 1985 г. представлен доклад в Ленинградском горном институте на кафедре минералогии, которой в то время руководил д.г.-м.н. профессор Дмитрий Павлович Григорьев. Сообщения о работах политехников в области изучения минерального состава и строения мочевых камней вызвали большой интерес минералогов и были рекомендованы для подготовки диссертационной работы.

Профессор С.Л. Шварцев, профессор Г.В. Шубин, профессор А.Г. Бакиров, профессор А.Ф. Коробейников ... Можно продолжить этот перечень заслуженных политехников-геологов, которые понимали важность научных исследований и оказывали постоянную поддержку.

В результате грамотного научного руководства профессором Александром Григорьевичем Бакиро-

вым в 1986 г. А.К. Полиенко была защищена первая в СССР диссертация по биоминералогии на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. Защита работы проходила на заседании диссертационного совета в Ленинградском горном институте с участием представителей Военно-Медицинской Академии и 1-го Ленинградского медицинского института. Во время защиты работы со стороны медицинских работников был проявлен живой интерес к рассматриваемым в диссертационной работе проблемам.



Фото 4. *Доцент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ, к.г.-м.н. Александр Константинович Полиенко (2011)*

Первым официальным оппонентом на защите был доктор геолого-минералогических наук, зав. отделом минералогии ИМГРЭ Мингео СССР, профессор А.Г. Жабин. Второй официальный оппонент, кандидат геолого-минералогических наук, старший геолог СПО «Севернокварцсамоцветы» Мингео СССР, один из основателей отечественной биоминералогии – Алексей Александрович Кораго. В 1992 г. он опубликовал первую в СССР монографию «Введение в биоминералогию» [8], которая в настоящее время является настольной книгой для специалистов, работающих в области биологической минералогии.

В качестве ведущей организации был определён Институт геологии Коми научного Центра Уральского отделения РАН (Сыктывкар), в котором неоднократно с докладами на конференциях и семинарах выступал А.К. Полиенко (фото 4). Директором Института в то время руководил Николай Павлович Юшкин, российский геолог и минералог, доктор геолого-минералогических наук, ныне академик РАН, заведующий кафедрой геологии Сыктывкарского государственного университета. Проблемы биологической минералогии уже тогда входили в сферу его научных интересов. Отзыв на диссертационную работу, направленный в совет по защите диссертаций, был положительный.

Диссертационный совет среди достоинств защищаемой работы отметил её практическую ценность. В выписке из заключения специализированного совета Д 063.15.04 при Ленинградском горном институте им. Г.В. Плеханова по кандидатской диссертации А.К. Полиенко «Особенности онтогении почечных камней» [9] по специальности 04.00.20 – минералогия отмечено:

1. «Практическая ценность. *На основании изучения состава, морфологии и анатомии, а также ритмичной зональности получена большая научная информация, характеризующая особенности онтогении почечных камней. Результаты выполненных исследований находят практическое использование в работе специалистов урологического отделения больницы № 3 г. Томска при выработке рекомендаций больным (справка № 328 от 27.09.86 г.). Выявление связей между заболеваниями, составом крови и мочи и минеральным и микроэлементным составами камней может быть использовано в прогностических целях специалистами-урологами*».
2. В Министерство здравоохранения СССР: *«В соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии при Совете Министров СССР специализированный совет Д 063.15.04 при Ленинградском горном институте им. Г.В. Плеханова направляет заключение специализированного совета по защите кандидатской диссертации А.К. Полиенко на тему: «Особенности онтогении почечных камней» по специальности «Минералогия» с целью рекомендации использования результатов работы при проведении соответствующих исследований в учреждениях Министерства». Председатель специализированного совета доктор геолого-минералогических наук, профессор В.Г. Лазаренков.*

Томские урологи И.С. Петров и В.А. Модестов [10] на конференции урологов в г. Челябинске в 1989 г. представили доклад «Зависимость мочекаменной болезни от химического состава питьевых вод Томской области».

Начиная с 1990 г. исследования выполнялись на основании договора о научном содружестве между Томским политехническим институтом и Томской областной клинической больницей по выполнению научно-исследовательской работы.

Вопросами биоминералогии в разное время занимались исследователи Г.А. Юргенсон и Г.А. Мироненко (Чита), А.А. Кораго (Ленинград), Б.В. Чесноков (Миасс), Б.Н. Лузгин (Барнаул), Ф.В. Зузук (Луцк).

В выполнении работ по изучению состава и структуры мочевых камней в Томском политехническом институте принимала участие А.А. Грибанова, заведующая лабораторией химико-технологического факультета ТПИ. На факультете была создана экспериментальная установка по растворению мочевых камней в лабораторных условиях. На ней работали студенты, выполняли эксперименты, выступали на студенческих конференциях.

Известны работы В.И. Катковой, В.И. Ракина (г. Сыктывкар) по изучению мочевых камней. В 2002 г. украинский исследователь Ф.В. Зузук

опубликовал монографию «Минералогия уролитов» (в 3-х томах). В 2007 г. в Томском политехническом университете О.А. Голованової, доцентом кафедры неорганической химии Омского государственного университета, защищена докторская диссертация: «Биоминералогия мочевых, желчных, зубных и слюнных камней из организма человека».

В последующие годы активную помощь в проводимых научных исследованиях оказывали доктор медицинских наук, заведующий кафедрой урологии Сибирского государственного медицинского университета, профессор А.В. Гудков, заведующий урологическим отделением Томской областной клинической больницы кандидат медицинских наук В.А. Мосеев, заведующий урологическим отделением клиники общей хирургии профессор В.Р. Латыпов, заведующий урологическим отделением медико-санитарной части № 2 кандидат медицинских наук В.Я. Афонин, а также ещё многие урологи г. Томска.

Работа по изучению патогенных образований была поддержана двумя грантами РФФИ в 1996 и в 1998 гг. Первый грант № 96-05-64587 «Исследование минералого-кристаллографических и биохимических особенностей патогенных образований (мочевых камней), второй грант № 98-05-03189 «Изучение влияния состава питьевой воды на формирование патогенных минеральных образований (мочевых камней) в организме человека. Результаты изучения мочевых камней изложены в совместных с урологами публикациях [11–14].

Кроме мочевых камней изучались отдельные желчные и слюнные камни, а также камни поджелудочной железы.

Мочевые камни (более 900 образцов) исследовались не только у жителей г. Томска и Томской области. Исследовались отдельные мочевые камни иногородних пациентов из Российской Федерации (Кемеровская область, Пермский край, Алтайский край, г. Новосибирск, Иркутская область, Республика Коми, Республика Хакасия, Якутия, Красноярский край, Горно-Алтайск) и из ближнего зарубежья (Узбекистан, Казахстан, Азербайджан), а также 2 мочевых камня из Индии. По минеральному составу мочевые камни распределились следующим образом: 70 % – оксалаты, 10 % – ураты, 5 % – фосфаты, 15 % – уролиты смешанного состава.

Мочевые камни весьма разнообразны по форме, характеру поверхности, окраске и размерам (фото 5).

Отдельные результаты работы докладывались на международных симпозиумах и конференциях (Канада, Южная Корея) [15, 16].

Изучение минерального состава и структуры уролитов (мочевых камней), начатое минералогами-политехниками, было поддержано ведущими урологами г. Томска, и активно продолжается в настоящее время.

По данным Регионального информационного фонда социально-гигиенического мониторинга по Томской области мочекаменная болезнь в ряде районов Томской области распространена крайне

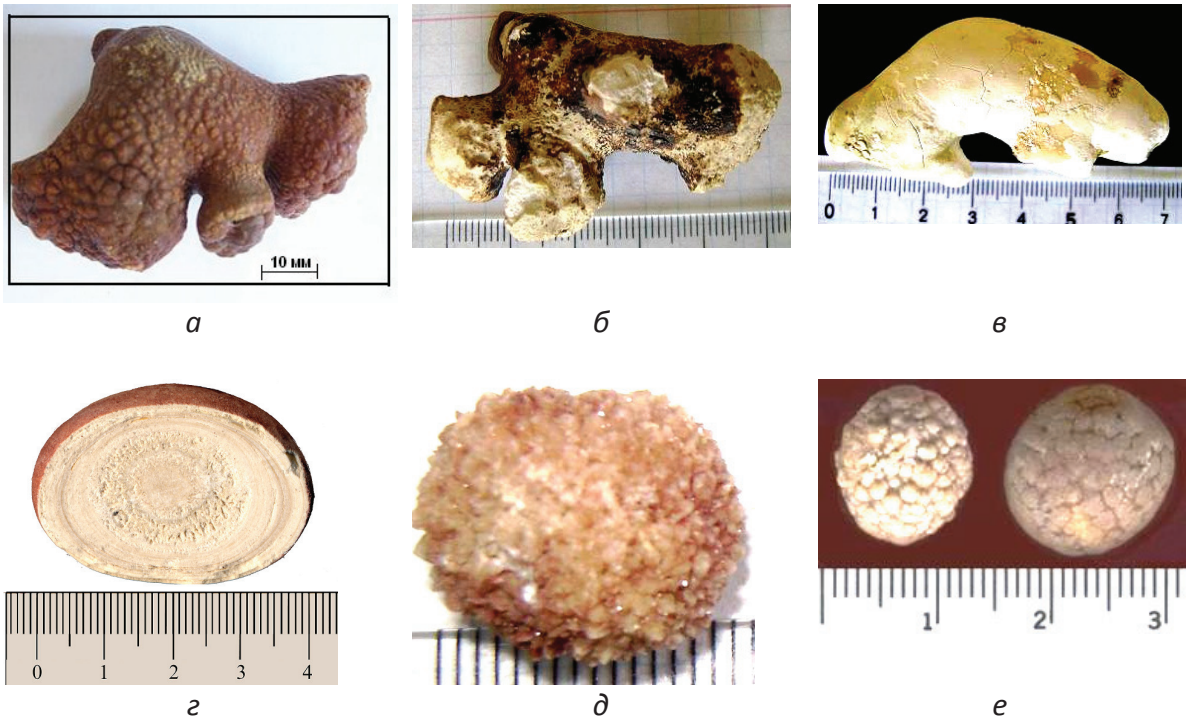


Фото 5. *Внешний вид уролитов и желчных камней: а–в) уролиты коралловидной формы фосфатно-мочекислого состава; г) ритмически-зональная структура уролита; д) друзовидный характер поверхности уролита (состав оксалатный); е) желчные камни*

неравномерно. Отмечено увеличение количества больных мочекаменной болезнью по годам.

В настоящее время исследования выполняются на кафедре общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. В структуре кафедры имеется лаборатория биоминералогии, в составе которой работают авторы настоящей статьи, а также Надежда Николаевна Мартынова, геолог-аналитик высшей квалификации, выполняющая микрохимические исследования мочевых камней. В работе по изучению органоминеральных образований также принимают участие сотрудники кафедры геоэкологии и геохимии.

Медицинские учреждения г. Томска являются главными «поставщиками» материала (мочевых камней) для изучения состава и структуры патогенных органоминеральных образований. Значительную поддержку в исследованиях оказывает заведующий кафедрой урологии Сибирского государственного медицинского университета профессор А.В. Гудков, а также сотрудники клиник СибГМУ, Областной клинической больницы, Медико-санитарной части № 2, городской больницы № 3 и других медицинских учреждений г. Томска. Авторы статьи принимали участие в работе и выступали на научно-практических конференциях урологов Сибири, организованных в г. Томске [17].



Фото 6. *Монографии коллектива сотрудников ТПУ по вопросам биоминерализации*

За время выполнения научных исследований получены результаты, представляющие научный и практический интерес как для минералогов, так и урологов. Научные результаты опубликованы в 3-х монографиях [4, 18, 19] (фото 6), а также в 75 статьях и тезисах докладов, представленных на конференциях и симпозиумах различного уровня (Томск, Москва, Санкт-Петербург, Чита, Сыктывкар, Миасс, Луцк, Львов, а также Китай, Южная Корея).

В научных исследованиях постоянно участвуют студенты и аспиранты, которые выступают с докладами на конференциях. Готовятся совместные работы минералогов и урологов для опубликования в специальных журналах как по минералогической, так и по урологической тематике, разрабатываются новые проекты совместных исследований.

Результаты научных исследований находят отражение в материалах диссертаций. По материалам исследований подготовлена к защите диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, продолжается работа по завершению докторской диссертации А.К. Полиенко.

Одним из основных научных достижений в изучении органоминеральных агрегатов является комплексная методика изучения патогенных образований, минералого-морфологическая классификация мочевых камней, ритмическая зональность мочевых камней и её особенности.

В качестве перспектив дальнейшего выполнения научных исследований в области изучения минерального состава, структуры и генетических особенностей мочевых камней (уролитов) следует отметить всё возрастающий интерес минералогов и урологов к этому важному научному направлению. Минералогические исследования мочевых камней включаются в планы научных исследований урологов на кафедре Сибирского государственного медицинского университета. На кафедре геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ в учебный план подготовки бакалавров включена дисциплина «Основы биоминералогии» (ведущий лектор доцент А.К. Полиенко). Изучение дисциплины предусматривает чтение лекций и проведение практических занятий по изучению минерального состава и строения мочевых камней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кораго А.А. Жемчуг Северо-Запада СССР // Записки Российского минералогического общества. – 1976. – Ч. 105. – Вып. 3. – С. 282–294.
2. Мак-Коннелл Д. Биоминералогия фосфатов и физиологическая минерализация // В кн.: Фосфор в окружающей среде / под ред. Д. Митчелл. – М.: Мир, 1977. – С. 462–481.
3. Сребродольский Б.М Биологическая минералогия. – Киев: Наукова думка, 1983. – 102 с.
4. Полиенко А.К., Шубин Г.В., Ермолаев В.А. Онтогения уролитов. – Томск: Изд-во РИО «Пресс-Интеграл» ЦПК ЖК, 1997. – 128 с.
5. Особенности морфологии камней почек / Полиенко А.К., Ермолаев В.А., Жуков Ю.Н.; Томск. политехн. ин-т. – Томск, 1984. – 22 с. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 14.08.1984, № 5831 – 84.
6. Полиенко А.К., Ермолаев В.А., Жуков Ю.Н. Морфология и генезис почечных камней // В сб.: Материалы к топоминералогии Урала / под ред. Б.В. Чеснокова. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – С. 107–111.
7. Петров И.С. Географическая распространённость нефролитиаза на территории Томской области // Матер. II научного совещ. по проблемам медицинской географии. – 23–27 ноября 1965 г. – Томск, 1965. – Вып. 2. – С. 171–172.
8. Кораго А.А. Введение в биоминералогию. – СПб.: Недра, 1992. – 280 с.

9. Полиенко А.К. Особенности онтогении почечных камней: автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук. – Л., 1986. – 21 с.
10. Петров И.С., Модестов В.А. Зависимость мочекаменной болезни от химического состава питьевых вод Томской области // Мочекаменная болезнь: Тез. докл. к IV областной конф. урологов / под ред. А.А. Кобелева, А.С. Шлыкова. – Челябинск, 1989. – С. 122–126.
11. Полиенко А.К., Шубин Г.В., Ваганов В.П. Патогенные органоминеральные образования в организме человека // В сб.: Медицинская минералогия (Матер. к XII регион. минералогической школе «Топоминералогические проблемы медицинской минералогии». – Сыктывкар, 1991. – С. 20–22.
12. Полиенко А.К., Шубин Г.В., Грибанова А.А., Ваганов В.П. Патогенные органоминеральные образования как следствие загрязнения окружающей среды // В сб.: Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды. Матер. Междунар. конф. – Томск, 1995. – С. 172–173.
13. Полиенко А.К., Севостьянова О.А., Мосеев В.А. Эпидемиология мочекаменной болезни в мире // Урология. – 2005. – № 5. – С. 68–71.
14. Полиенко А.К., Севостьянова О.А., Мосеев В.А. Влияние некоторых причин на распространение мочекаменной болезни в мире // Урология. – 2006. – № 1. – С. 218–222.
15. Poliyenko A.K. Mineral composition of urine stones // Joint Annual Meeting of the Geological Association of Canada and the Mineralogical Association of Canada. – Sudbury, Ontario, Canada, Laurentian University, 1999. – P. 215–217.
16. Poliyenko A.K., Dutova E.M. Urinary stones investigation and influence of the water factor to their formation in a human organism // Proc. the 4th Korea-Russia Intern. Symp. of Science and Technology. P. l. – June 27 – July l, 2000. – Ulsan, 2000. – P. 278–283.
17. Полиенко А.К., Шубин Г.В. Онтогенические исследования особенностей морфологии и анатомии мочевых камней // Актуальные вопросы урологии: Матер. научно-практ. конфер. урологов Сибири. – 20.11.1998, Томск. – Томск, 1998. – С. 22–24.
18. Волков В.Т., Волкова Н.Н., Смирнов Г.В., Полиенко А.К., Ермолаев В.А., Бакиров А.Г., Медведев М.А., Рихванов Л.П., Сухих Ю.И. Биоминерализация в организме человека и животных. – Томск: Тандем-Арт, 2004. – 498 с.
19. Полиенко А.К., Бакиров А.Г. Основы кристаллографии и минералогии для урологов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 108 с.

Поступила 14.12.2011

Наши юбиляры

ПРОФЕССОРУ С.Л. ШВАРЦЕВУ – 75 ЛЕТ



14 сентября 2011 г. исполнилось 75 лет Степану Львовичу Шварцеву – широко известному в России и в мире ученому, руководителю Сибирской гидрогеохимической школы, талантливому организатору подготовки геологических кадров, сделавшему большой вклад в развитие гидрогеологической науки в Сибири. Степан Львович – Лауреат Государственной премии СССР, Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный геолог РФ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, с 1976 г. и по настоящее время заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ. Даже простое перечисление всех научных достижений и почетных регалий этого выдающегося ученого займет немало страниц.

С отличием окончив в 1960 г. Томский политехнический институт по специальности «Гидрогеология и инженерная геология», С.Л. Шварцев был направлен в Обь-Иртышскую экспедицию СНИИГГиМС, где работал инженером, позже начальником отряда, под руководством в то время доцента ТПИ (ныне ТПУ) Павла Афанасьевича Удодова. Поступив в 1961 г. в заочную аспирантуру ТПИ, в 1964 г. он под научным руководством П.А. Удодова защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Формирование химического состава подземных вод в районах сульфидных месторождений в условиях развития многолетнемерзлых пород». С 1965 г. С.Л. Шварцев – доцент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ТПИ.

В 1966 г. Степан Львович направляется для работы в Гвинею, где читает курсы общей геологии, гидрогеологии и геохимии на французском языке и занимается научно-исследовательской работой.

Возвратившись из Гвинеи в 1968 г., Степан Львович продолжает работу на кафедре и одновременно ведет исследования по геохимии подземных вод Колывань-Томской зоны, Алтая, Кузбасса, Кураминского хребта (Узбекистан) и др. районов бывшего СССР.

В 1979 г. он защищает в МГУ докторскую диссертацию на тему: «Формирование химического состава подземных вод зоны гипергенеза». В 1982 г. ему присвоено ученое звание профессора. С 1978 г. С.Л. Шварцев совместно с Е.В. Пиннекером начинают работу над шеститомной монографией «Основы гидрогеологии», в которой непосредственно участвует в написании 1, 3 и 4 томов; является ответственным редактором третьего тома «Гидрогеохимия». За эту монографию, наряду с другими авторами, в 1986 г. он удостоен звания «*Лауреат Государственной премии СССР*».

В течение 10 лет (1980–1990 гг.) С.Л. Шварцев работает деканом геологоразведочного факультета ТПИ. По его инициативе и непосредственном руководстве в это время открыта подготовка инженеров по двум новым специальностям: «Бурение нефтяных и газовых скважин» (1982 г.) и «Разработка нефтяных и газовых месторождений» (1987 г.).

В 1991 г. Степан Львович, оставаясь заведующим кафедрой в ТПУ, переходит на работу в Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии (ОИГГМ) СО РАН, где организует в его Томском отделении лабораторию гидрогеологии и геоэкологии. В 1997 г. на базе Томского отделения ОИГГМ СО РАН он создает Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики, который возглавляет до настоящего времени. С 1991 г. в Томском отделении ОИГГМ СО РАН был организован филиал кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии ТПУ. Позже под руководством С.Л. Шварцева в Институте геологии и нефтегазового дела ТПУ организован учебно-научно-производственный центр «Вода».

В 1996 г. на кафедре С.Л. Шварцевым открыта новая специальность «Комплексное использование и охрана водных ресурсов. С 1993 г. начата подготовка бакалавров, а с 1997 г. – магистров по четырем образовательным программам.

Степан Львович впервые в мировой практике создал новое научное направление в области взаимодействия воды с горными породами, развил современную концепцию формирования состава подземных вод. Им подготовлено 8 докторов и 40 кандидатов наук, опубликовано 508 работ, в том числе 20 монографий и 2 учебника, 150 работ переведены на английский язык и/или изданы за рубежом, в том числе 2 монографии – в Великобритании и Германии.

Успешное сотрудничество академической и вузовской науки в последние 10–12 лет позволило получить государственную поддержку научных исследований, проводимых научной школой под руководством С.Л. Шварцева.

Обширны научные связи Степана Львовича с учеными зарубежных стран – Китаем, Францией, США. Он участник международных геологических конгрессов в Канаде (1972 г.), Москве (1984 г.), и Китае (1996 г.), гидрогеологических конгрессов в Вильнюсе (1979 г.), Братиславе (1999 г.), Кракове (2010 г.), Генеральной Ассамблеи по водным ресурсам (Испания, 1997 г.) и многих международных зарубежных симпозиумов по взаимодействию воды с горными породами (Франция, Великобритания, Чехословакия, Китай, Италия, Мексика и др.), геохимическим методам поискови т. д.

С.Л. Шварцев – член нескольких научных советов РАН и СО РАН, двух учебно-методических объединений Минобразнауки РФ, Координационного Совета по геологии и использованию недр Администрации Томской области, Международной ассоциации гидрогеологов, Международной академии экологической гидрологии, Международного географического общества, Международной ассоциации геохимии и космохимии, академик Международной академии минеральных ресурсов, Российской академии естественных наук, Русской академии наук и искусств. С.Л. Шварцев аттестован Американским гидрологическим институтом. Международный биографический центр (Кембридж, Великобритания) включил его в 2005 г. в число 2000 выдающихся ученых XXI века, а издательский совет «The Marquis Who's Who» (Нью-Провиденс, США) – в список лиц, которые добились выдающихся результатов в науке или инженерном деле и оказали большое влияние на социальное состояние общества.

Ученики и коллеги по работе ценят в Степане Львовиче такие черты, как целеустремленность, одержимость наукой и постоянное стремление к саморазвитию, невероятную работоспособность, неукоснительное следование принципу завершенности начатого дела. Его активная жизненная позиция является высоким примером служения геологической науке и обществу.

Сотрудники Института природных ресурсов ТПУ, друзья и коллеги желают Степану Львовичу крепкого здоровья и неиссякаемого энтузиазма в достижении новых намеченных целей, расширяющих горизонты научного знания по воде. Пусть благодарные ученики развивают идеи определяющей роли самого ценного полезного ископаемого в природных процессах и жизни человека. Надеемся, что новые достижения кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии ТПУ и успехи Сибирской гидрогеохимической школы будут связаны с именем Степана Львовича Шварцева.

ПРОФЕССОРУ И.В. ГОНЧАРОВУ – 65 ЛЕТ



3 января 2012 г. исполнилось 65 лет со дня рождения профессора, доктора геолого-минералогических наук, профессора кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ Ивана Васильевича Гончарова. Иван Васильевич родился 3 января 1947 г. в д. Начало Томской области в крестьянской семье. В 1964 г. экстерном окончил среднюю школу и поступил на химико-технологический факультет Томского политехнического института. С третьего курса начал активно заниматься научной работой, поэтому после окончания института продолжил обучение в аспирантуре. Кандидатская диссертация на тему «Исследования в области синтеза из окиси углерода и водяного пара» была защищена в ТПИ в 1972 г. В ней была сделана оценка роли различных факторов на состав образующихся органических соединений в условиях абиогенного синтеза нефти. В этот период большое влияние на формирование личности молодого учёного оказали очень сильный коллектив кафедры химической технологии твёрдого топлива и её заведующий –Станислав Иванович Смольянинов.

После окончания аспирантуры (1972 г.) работа в Институте химии нефти АН СССР (г. Томск) над исследованием различных классов гетероатомных соединений нефти. На основе полученных результатов были выявлены важные с точки зрения химии и геохимии нефти закономерности в составе нефтяных фенолов и кислот. В частности, впервые были идентифицированы алкилфенолы в сырых нефтях. Параллельно проводятся прикладные исследования по нефтепереработке и нефтехимии, поэтому с 1974 г. с целью внедрения в производство полученных результатов, работа руководителем лаборатории института на Омском нефтеперерабатывающем комбинате.

С 1978 по 1990 гг. И.В. Гончаров работал в Западно-Сибирском научно-исследовательском геологоразведочном нефтяном институте в должности зав. лабораторией геохимии нефти (г. Тюмень). В это время рядом работали первооткрыватели нефти в Западной Сибири, Лауреаты государственных премий: А.Д. Сторожев, Ю.Э. Эрвье, Ф.К. Салманов, И.И. Нестеров и многие другие. Руководил институтом Иван Иванович Нестеров, который оказывал большую поддержку геохимическим исследованиям. Работа в г. Тюмени – самый плодотворный период научной работы Ивана Васильевича. В это время им опубликовано более 40 работ в престижных изданиях страны и за рубежом, в том числе монография «Геохимия нефтей Западной Сибири». В 1989 г. в ГЕОХИ АН СССР И.В. Гончаровым защищена докторская диссертация – «Геохимические критерии нефтегазоносности и прогноза качественного состава нефтей». Разработанные в ней теоретические положения существенно расширили представления о процессах, определяющих качественный состав нефтей и их количество, и были использованы в практике, в частности, при переоценке потенциальных ресурсов углеводородного сырья Западной Сибири.

В 1990 г. Иван Васильевич был приглашён на работу в Алжир, где до конца 1993 г. проработал в качестве руководителя геохимической службы государственной нефтяной компании Sonatrach. Итогом работ явилась генетическая типизация нефтей Алжирской Сахары, что имеет принципиальное

значение при планировании геологоразведочных работ на нефть. Параллельно были впервые обнаружены длинноцепочечные алкилнафталины в нефтях. Результаты исследований были опубликованы в трудах Международного геохимического конгресса (1993 г.) в г. Ставангере (Норвегия).

После возвращения из Алжира (1994 г.) и по настоящее время работа в должности профессора ТПУ и одновременно руководителя лаборатории, а затем заместителя директора института «ТомскНИПИнефть». При активном участии И.В. Гончарова была создана Газовая программа Томской области, с которой началась разработка Мыльджинского нефтегазоконденсатного месторождения.

В это сложное для страны время благодаря работам, выполняемым по заказам различных нефтяных и газовых компаний, удалось создать и оснастить современным оборудованием одну из лучших в России лабораторий, в которой работают студенты и аспиранты ТПУ. На основе полученных материалов было обосновано наличие в Западной Сибири трёх основных генетических типов нефтей (баженовский, тогурский, палеозойский), оценить их катагенез и выявить закономерности распространения. Это стало возможным благодаря переходу от витринитовой шкалы катагенеза к единой для нефтей, экстрактов из пород и органического вещества системе молекулярных параметров. Результаты нашли отражение в серии патентов и публикаций в стране и за рубежом. Ведётся активное сотрудничество с крупнейшими нефтяными компаниями (Shell, British Petroleum, Chevron) и Французским институтом нефти (IFP).

Педагогическая работа И.В. Гончарова заключается в чтении курса «Геология и геохимия нефти и газа», а также в работе с аспирантами. Большая работа была проведена по организации филиала Эдинбургского университета Heriot-Watt в ТПУ. Благодаря этому ТПУ стал первым российским вузом, где выпускники получают диплом европейского образца.

Вне работы – ожидание лета, когда можно будет общаться с пчёлками. Детство Ивана Васильевича прошло на пасеке, поэтому у него на всю жизнь осталась любовь к этим удивительным созданиям природы. Чтобы пополнить знания, параллельно с аспирантурой он окончил заочно Институт пчеловодства, а теперь уже сам регулярно публикует статьи в специальных изданиях по пчеловодству. Удалось разработать такую систему ухода за пчёлами, при которой в суровых сибирских условиях прямо под снегом зимуют пчёлы южных пород, отличающиеся исключительным миролюбием. Рядом с ульями море цветов, среди которых различные сорта роз, клематисы, жасмин. Среди плодовых деревьев и кустарников не только традиционная смородина и малина, но и вишни, виноград, нежный и ароматный «Белый налив».

Институт природных ресурсов, кафедра геологии и разведки полезных ископаемых ТПУ, сотрудники института «ТомскНИПИнефть», друзья и ученики, поздравляя Ивана Васильевича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, счастья и дальнейших успехов как в научной работе, так и во всем, что помогает ему их осуществлять!

Некролог

ПРОФЕССОР С.С. СУЛАКШИН (1919–2011)



Степан Степанович Сулакшин родился 22 ноября 1919 г. в станице Ловлинской Краснодарского края. В 1938 г. с отличием окончил школу в г. Кропоткине и поступил в Московский геологоразведочный институт (МГРИ).

В начале Великой Отечественной войны, будучи студентом четвертого курса, С.С. Сулакшин принимает активное участие в обороне Москвы в рядах народного ополчения, а в январе 1942 г., несмотря на имеющуюся отсрочку, уходит добровольцем на фронт. Его ратный труд в годы Великой Отечественной войны отмечен орденами Красной Звезды, Отечественной войны I степени и многими боевыми медалями. В 1944 г. после второго тяжелого ранения и демобилизации в звании капитана Степан Степанович возвращается в МГРИ, который он успешно закончил в 1948 г., получив диплом горного инженера по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых». В том же году С.С. Сулакшин поступает в аспирантуру при кафедре разведочного бурения МГРИ, защитив в 1952 г. кандидатскую диссертацию.

В далёком 1952 г. после окончания аспирантуры и защиты кандидатской диссертации Степан Степанович прибыл в г. Томск. В 1954 г. с открытием в ТПИ кафедры техники разведки МПИ он избирается на должность заведующего кафедрой и бессменно руководит ею в течение 32 лет. За эти годы были созданы лабораторная база и методическое обеспечение учебного процесса по специальности «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых». Созданные лаборатории позволяли проводить не только учебные занятия, но и выполнять на высоком уровне научные исследования по совершенствованию технологии и техники бурения скважин.

Под руководством С.С. Сулакшина был выполнен большой объем исследований для производ-

ственных организаций. В 1965 г. Степан Степанович защищает докторскую диссертацию, а в 1966 г. ему присуждается учёная степень доктора технических наук.

Профессор С.С. Сулакшин является основателем Сибирской научной школы в области бурения геологоразведочных скважин, нашедшей признание не только в России, но и за её пределами. Главным научным направлением Степана Степановича является исследование и разработка прогрессивных средств и технологии бурения скважин с целью повышения эффективности и качества буровых работ. В этом направлении им разрабатывались две основные проблемы: направленное бурение скважин и получение представительных образцов пород и проб полезных ископаемых в сложных геологических условиях.

В списке научных трудов С.С. Сулакшина насчитывается более 350 наименований, в том числе 23 монографии, 6 учебников. Два учебника переведены на китайский язык. Изданы 14 учебных пособий для студентов вузов, 9 брошюр, получено 22 авторских свидетельств и патентов. Эти работы широко известны среди производственников и исследователей. Не одно поколение студентов учится и будет еще долго учиться по учебникам С.С. Сулакшина. Им подготовлено 44 кандидата и 2 доктора технических наук, создан научный коллектив, эффективно ведущий актуальные научные исследования на протяжении многих лет. За годы работы С.С. Сулакшина в ТПУ на кафедре техники разведки подготовлено 2200 горных инженеров, работающих в производственных организациях, в научно-исследовательских учреждениях и вузах.

За большие заслуги в подготовке инженерных кадров и научных работников для геологоразведочной отрасли, а также большой вклад в создание минеральной сырьевой базы государства профессор С.С. Сулакшин награжден орденом «Почета», медалью «За доблестный труд». Российской Академией Естественных наук он награждён почетным знаком «За пользу Отечеству» им. В.Н. Татищева. За научные и практические разработки С.С. Сулакшин награждён тремя медалями ВДНХ СССР, а также знаками «Изобретатель СССР» и «Отличник разведки недр». В 1998 г. решением Ученого Совета ТПУ профессору С.С. Сулакшину присвоено звание «Заслуженный профессор Томского политехнического университета», а в 2000 г. за большой вклад в подготовку кадров, развитие науки и материально-технической базы ТПУ он был удостоен золотой медали «За заслуги перед Томским политехническим университетом» и дипломом 1-й степени.

Коллектив кафедры бурения скважин по праву гордится тем, что среди них трудился основатель кафедры, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, Лауреат премии Совета Министров СССР, Почётный разведчик недр, Отличник разведки недр, Почётный академик АЕН РФ, «Почетный работник профессионального образования Российской Федерации» – Степан Степанович Сулакшин.

С.С. Сулакшин работал на кафедре до последних дней своей жизни, продолжая вносить большой вклад в дело подготовки инженеров и специалистов высшей квалификации. Буквально несколько дней не дожил он до издания своего последнего учебника с грифом УМО вузов Российской Федерации, написанного со своим учеником ректором ТПУ П.С. Чубиком.

Друзья, ученики, коллеги искренне скорбят по поводу ухода из жизни Степана Степановича и уверены, что добрая память о нем сохранится в их сердцах на долгие годы.

Summaries

UDC 551.248.2:551.435.8(1–925.15)

Gudymovich S.S.
THE USE OF ANCIENT KARST FOR PALEOGEOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS AND ANALYSIS OF NEOTECTONIC MOVEMENTS

The author describes a new area of development of the ancient covered karst in the interfluve in Batenevsky range of Minusinsky depression. Such karst influvium power is proposed to be used as the reference marks of preneotectonic relief at paleogeographic reconstructions; the difference between the absolute marks of the influvium bottom and valley bottoms of a modern erosional pattern is used as the amplitude of neotectonic uplift.

UDC 549.11+611.466.1

Polienko A.K., Potseluev A.A., Ilyenok S.S.
HETEROGENEITY OF UROLITH CHEMICAL COMPOSITION

The authors studied the distribution of chemical elements in urolith structure and obtained the data on certain elements distribution and ratio in the points on the profile and in the shear (section) plane. It was ascertained that the heterogeneity in element distribution in the structure is connected with the features of urolith growth regions. It is recorded at the boundaries dividing mineral and organic components of urolith. The authors ascertained that some chemical elements occur in many observation points and the other ones are rarely observed.

UDC 548.75:549.514.51

Korovkin M.V., Ananyeva L.G., Antsiferova A.A.
EVALUATION OF QUARTZITE TRANSFORMATION DEGREE BY THE INFRARED SPECTROSCOPY METHOD

The samples of quartzites picked from ore bodies of «Sopka-248» deposit in the Antonovsk group of fields (Russia, Western Siberia) were examined by the infrared spectroscopy method. Sediment-metamorphic quartzite is the product of lithification under the conditions of earlier metagenesis of quartz- hydromicaceous- sericitic facies. Amorphous silica was crystallized and crystalline phase of α-quartz occurred due to metamorphism of flinty biogenic strata. In order to evaluate the degree of quartzite change the authors used the crystallinity index calculated by the parameters of double peak of infrarded absorption at 778 and 797 cm^{-1} which is conditioned by oscillations of Si–O–Si bounds in quartz. It was observed that the purest quartzites are characterized by the lowest relative values of the crystallinity index.

UDC 553.411.071:553.078.2

Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu.
STRUCTURAL AND DYNAMIC REGIMES OF FORMING GOLD-SULPHIDE-QUARTZ MINERALIZATION IN SULBAN GOLD-ORE ZONE (VITIM MID-CHANNEL BASIN). P. 2. URJAH ORE FIELD

The article describes the most important fractured structures of Urjah ore field determining the location of gold-sulphide-quartz mineralization and rock jointing diagrams. The force field plans were reconstructed at the pre-ore and ore stages of forming the ore field structure. The authors show the difference of the scales of ore containing structures formed in Karalon and Urjah ore fields. They discuss in comparative aspect the results of studying the structural and dynamic regimes of forming gold mineralization on the Northern flank of Sulban gold-ore zone and state the conclusions.

UDC 553.411.071.242.4+550.4

Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V.
PETROLOGIC AND GEOCHEMICAL FEATURES OF WALLROCK METASOMATISM IN SUKHOI LOG GOLD FIELD (LENSKIY REGION). P. 2 PETROLOGY OF WALLROCK METASOMATISM

The article introduces the results of reconstruction of mineralogical and petrochemical zonation at ore containing metasomatic halo in Sukhoi Log deposit. The authors prove the halo belonging to beresite metasomatic formation combining with the propylite one. The features of wallrock metasomatism in black shales rocks are discussed.

UDC 551.411(575.5)

Ananyev Yu.S., Potseluev A.A., Zhitkov V.G.
COSMO-STRUCTURAL POSITIONS OF GOLD DEPOSITS IN OVER-ANGARA PART OF YENISEI RIDGE

Cosmo-structures of the over-Angara part at Yenisei ridge were examined based on the materials of multispectral space systems Modis and Landsat ETM+. The authors singled out four systems of the first order ring structures interpreted as granitization depth regions. The laws of gold mineralization location in cosmo-geological structures were shown. The selected cosmo-geological structures of different ranks are embodied in abnormal structures of geochemical fields.

UDC 550.84:553.411.071

Ilyin S.S, Makarov V.A.
GEOCHEMICAL ZONALITY OF GOLD DEPOSIT «QUARTZ MOUNTAIN» (ENISEI RIDGE)

The article discusses zonality of primary geochemical haloes of gold deposit «Quartz Mountain» (Enisei ridge). On the basis of spectral analysis of core samples a three-dimensional distribution of gold and satellite elements was studied; vertical and cross zonatities of the ore-mineralized zone were characterized. Vertical volatile correlations of gold and satellite elements were characterized. Geochemical associations, including two gold-bearing ones were identified and described. The authors determined a relationship of coarse, well-fineness gravity gold with an overlaid polymetallic association. The conclusion on a medium-lower ore zone erosion of an object was made.

UDC 553.3.071

Timkin T.V.
ENDOGENOUS ORE-METASOMATIC ZONALITY OF MAYSK-LEBEDSK GOLD ORE FIELD

Primary ore-metasomatic zonality of Maysk-Lebedsk ore field (Gornaya Shoria) was studied. The occurrence and distribution of ore substance on the levels of ore body, deposit and the ore field as the whole were shown. The authors ascertained that gold ore areas have low ore zone erosion and their depth potential.

UDC 552.11:552.3:550.4:550.93(571.51)

Vrublevskii V.V., Sazonov A.M., Gertner I.F., Tishin P.A., Kolmakov Yu.V.
GEOCHRONOMETRY AND MAGMATIC SOURCES OF ALKALINE ROCKS AND CARBONATITES OF SOUTHERN OVER-ANGARA PART, YENISEI RIDGE

The derivatives of mantle magmatism in South over-Angara part in Yenisei Ridge are represented by medium-tatarian ijolite-foyaite and penchenginskiy fenite-carbonatite complexes of neo-Proterozoic era. The initial phases of their establishment (~725...680 million years ago) coincide with one of the eras of plume activity and rifting at the edge of Siberian paleocontinent. The sources of parental magmas conform in Nd-Sr-isotope parameters to the material of depleted mantle of PREMA/FOZO and E-MORB-types at certain mixing with saturated substance EM I. Geodynamic condition and initial positional closeness of late-Precambrian mantle alkaline magmatism occurrence are supposed to be identical in Yenisei Ridge and Eastern Sayan.

UDC 552.2+550.4(571.513)

Vorontsov A.A., Fedoseev G.S.
THE CONDITIONS FOR FORMING DEVONIAN BASALTS AND DOLERITES OF SHIRA-SHUNET REGION IN MINUSINSK TROUGH

The article introduces the data on the structure of Shira-Shunet region in Chebakovo- Balakhtinsk basin of Minusinsk trough; the authors consider geochemical and Sr-Nd isotope features of basites. It was determined that heterofacial basites are close to each other in the content of major and rare lithophylic elements that indicates their origin from a common magmatic source. It was shown that the source composition possesses the intermediate characteristics between the compositions of intra-plate sources of OIB and IAB types common for magmatism of convergent boundaries of lithophylic elements.

UDC 553.984;552.54

Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M.
WEATHERING ROCKS OF PRE-JURASSIC ROCKS OF WESTERN-SIBERIAN GEOSYNECLISE

Pre-Jurassic (Vendian, Paleozoic) rocks of south-east part of Western-Siberian geosyneclise underwent successive transformations: diagenesis and primary katagenesis during and just after petrification; orogenic stage of development and weathering crust formation in permi-Triassic; secondary katagenetic transformations starting with the Jurassic period. The weathering crusts are developed along the whole area of Paleozoic rock outcrop to the pre-Jurassic surface in the form of a thin near-surface zone of refined reservoir properties, in the form of siliceous-clay rubble mass by similar composition deposits; the bauxites including the re-deposited ones are developed by the changed effusives of the main composition and tuffsa. The reservoirs are formed in the weathering crust formations. Their combination is called the oil and gas bearing contact zone horizon. The geometry of the formed oil and gas traps has the linear-extended blanket form.

UDC 553.984;552.54;551.253

Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M.
SECONDARY CATAGENETIC TRANSFORMATIONS OF PRE-JURASSIC ROCKS OF WESTERN-SIBERIAN GEOSYNECLISE

Due to occurrence of secondary catagenetic transformations of pre-Jurassic rocks in Western-Siberian geosyneclise the reservoir rocks of crack-metasomatic nature were formed in Paleozoic carbonate rocks. Dolomitization and leaching of limestone, kaolinisation and sideritisation of siliceous-carbonate and siliceous-clay rocks are the main hydrothermal processes. The development of oil and gas reservoirs and traps of hydrothermal-metasomatic nature is controlled by the fault grid of north-west and north-east bearing; at overlapping of the latter on the fields of carbonate rock development the reservoir rocks are formed. The geometry of formation does not depend on pre-Jurassic surface relief but on fault direction and the secondary process occurrence degree. They may occur separately or form a unified complex with the deposits associated with the weathering rocks.

UDC 550.83:519.241

Erofeeva G.V., Erofeev L.Ya.
ON THE TECHNIQUE OF ESTIMATION AND GEOLOGICAL INTERPRETATION OF PHYSICAL FIELD ANISOTROPY

The authors analyze the opportunities of estimation procedures for anisotropy of physical fields studied in geoexploration. The article introduces a new technique for determining field anisotropy for anomalies of the second and minor orders; its efficiency is shown by a concrete example of a magnetic field.

UDC 550.83:551.3

Ustinova V.N., Ustinova I.G.
DISCRETE HIERARCHICAL SYSTEMS IN GEOPHYSICS

Sampling, hierarchical nesting and existence of typical forms of geological objects and geophysical fields allowed ranking them, developing probabilistic statistical methods for analyzing similar systems and field separation. The authors found out the presence of typical forms for seismic structures; reflected seismic signals; in morphological occurrence of seismic facies containing hydrocarbon accumulation; in space combination of structure-forming fractures. Typing of structure forms, morphological forms of geophysical anomalies, seismic signal with the assistance of autocorrelative analysis found application in procedures of recovering seismic signal and structural imaging while forming effective graphs for processing and interpreting seismic data.

UDC 550.831.053

Isaev V.I., Gulenok R.Yu., Lobova G.A.
INTERPRETATION OF HIGH-PRECISION GRAVITY SURVEY DATA. THREE-DIMENSIONALITY OF OBJECTS

The authors introduce the characteristic for lateral variation of lithophysical properties of oil and gas complexes at local objects. They propose the algorithm and technique of three-dimensional geo-density modeling of objects prospected by seismic survey, determination and delineation of high-porous lithofacies. The reverse linear problems of high-precision gravity survey are solved at the complexity universal near-real model. It allowed estimating the precision of determination and delineation of thin lithofacies. Applying only the algorithms and the two-dimensional modeling technique one can obtain the unacceptable errors in solution. The article introduces the example of solution for three-dimensional problem of high-precision gravity survey on Sakhalin Verkhenyshsk gas condensate field.

UDC 550.831.01

Pyatakov Yu.V., Isaev V.I.
THE TECHNIQUES FOR SOLVING THE DIRECT GRAVITY PROBLEMS

The article introduces the analytical survey of the techniques for solving the direct gravity problems. Approximation of density distribution is carried out by a set of elementary bodies of geometric shape having the predetermined density variation law. The authors stated the requirements for optimal algorithms of solving the direct problems and gave recommendations on their implementations.

UDC 681.584.311

Prishchepov S.K., Vlaskin K.I.
MAGNETOMETRIC DEVICE FOR DETECTING HIDDEN SUBSURFACE OBJECTS

The authors determine problem specification of searching the hidden ferromagnetic subjects against a background of action of the earth normal magnetic field. The article considers the capacities of magnetometers intended for detecting magnetic anomalies. The authors introduce the complex gravity magnetometric device for determining the position of local magnet objects covered in non-ferromagnetic hiding environments.

UDC 552.31:546.71

Korobeynikov A.F., Chernyshov A.I.
RHENIUM DISTRIBUTION IN SIBERIAN ULTRAMAFITES MINERAGENIC TYPES

Ultramafites of ophiolitic subvolcanic complexes of Sayan and Aldanian shield fold systems bear from 0,2 to 569 mg/t of Re. Dunites and harzburgites of Kalninsk and Kyzyr-Burlyuksk masses of Kurtushibinsk (West-Sayan) ophiolitic belt possess high concentrations of the element as well as Ospinsk mass of the East-Sayan belt with Re content to 383 and to 167 mg/t respectively. The authors discuss the features of Re distribution in various structural and deformation types of ultramafites. The least deformed protogranular dunites of the Western Sayan has high concentration of Re 56...90 mg/t. Plastically deformed difference of rocks with the most ordered mesogranular structure contains only 1...15 mg/t of Re. Rhenium content varies from 2 to 167 mg/t in syntectonically recrystallized dunites and harzburgites with porphyroclust, porphyrolath and mosaiclath structures. Chromite ores of ophiolitic complexes contain from 23 to 383 mg/t of Re. Serpentinites as the products of low-temperature metasomatism are characterized by low background anomalous concentrations of rhenium to 547 mg/t. Low Re contents from 0,3 to 364 mg/t are usually observed in dunites of alkali-ultrabasic Inaglinsk mass (Aldanian shield) with various deformation microstructures and in wehrlite, clinopyroxenites as well as metasomatites associating with them. Garnetiferous peridotite inclusions in kimberlite bodies of Siberian platform have the highest concentrations of rhenium to 6,8 g/t. It is probably caused by the processes of substance redistribution at intra-mantle high-temperature metasomatism.

UDC 552.513.550.8(571.16)

Ezhova A.V.
LITHOLOGICAL AND GEOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF JURASSIC OIL AND GAS GRAVELITES, SANDSTONES AND SILT STONES OF SOUTH-EAST IN WESTERN-SIBERIAN PROVINCE

The author considers the influence of structural-material composition of gravelites, sandstones and silt stones on the data of spontaneous potential and apparent resistivity logging, induction, natural radioactivity, neutron and caliper logging. It was ascertained that geophysical characteristic of gravelites and sandstones is determined by the composition of fluids and cements filling the intergranular space and to a less degree – by mineralogical composition; in slit stones the clay content influences greatly on geophysical parameters.

UDC 552.578.2.061.33

Khromovskikh A.Yu.
THE NATURE OF PLUNGING OIL-WATER CONTACTS OF UPPER-JURASSIC OIL ACCUMULATIONS IN KAYMYSOV ARCH

It was ascertained that the regional hydrodynamic thrust and capillary pressure in reservoir rocks are the main factors controlling hydrocarbon distribution having migrated from Bazhenov formation within the upper-Jurassic accumulations.

UDC 550.84:551.8

Serebrennikova O.V., Hai V.V., Savinykh Yu.V., Krasnoyarova N.A.
OIL GENESIS IN «WHITE TIGER» DEPOSIT (VIETNAM) BY THE DATA ON COMPOSITION OF SATURATED ACYCLIC HYDROCARBONS

The article describes general characteristics of dispersed organic substance composition of Miocene and Oligocene rocks within the «White Tiger» deposit (Vietnam) and compares it to proper oil characteristics.

UDC 553.98

Gladkov E.A.
THE CONSIDERATION OF DEFORMATION-METASOMATIC CONVERSION OF OIL AND GAS DEPOSITS AT THEIR DEVELOPMENT

When developing oil and gas deposits their initial reservoir properties change. The deformation-metasomatic conversion of productive deposits may be a possible reason. The processes resulting in a change of volume of void-pore space of both carbonate and terrigenous rocks should be taken into account.

UDC 550.8.05

Zakharova A.A., Krokhalev I.V., Peshkov V.E., Peshkov I.V., Parovinchak K.M., Sinitsyn E.A.
DETERMINATION OF THE DESIGN DATA FOR ESTIMATING RESERVES ON OIL DEPOSITS BY THE RESULTS OF HYDRODYNAMIC WELL INVESTIGATIONS

The authors introduce theoretical substantiation of the method for determining oil displacement efficiency at natural conditions of deposit exploration. The coefficients obtained conform to the experimental data. The advantage of the technique is the account of larger (up to 10 ha) area of a layer when calculating oil filtration in reservoir conditions in comparison with the core model characterizing one point in a layer. The article shows that the technique error does not exceed 0,7 % at three times parameter determination at one well.

UDC 504.064.2.001.18:550.8.015

Lukin Al.A.
ESTIMATION OF HYDRODYNAMIC IMPACT OF WELL OPERATION CONDITIONS BASED ON STATISTICAL FUNCTIONS

The author studied the impact of operation of production wells at the Siberian chemical plant wastes landfill on pressure oscillations in observation wells and generation of frequency components of manmade and natural oscillations in a spectrum. The article demonstrates the opportunity of using the cross-correlation function and Fourier-analysis for estimating hydrodynamic impact of production well functioning.

UDC 550.42:57.4 (571.1)

Savichev O.G.
DEFINITION OF ICE JAM LEVELS OF RIVER WATERS IN THE SOUTH OF THE WESTERN SIBERIA

The method of definition of additional increase in water levels during ice jams (as function of the water discharge and ice thickness) is offered. Its approbation is carried out by the example of the rivers of a southern part of Western Siberia (Tom, Chulym, Kiya, Usa, Mras-Su and Kondoma rivers). The conditions of ice jam formation on the rivers considered with additional water level rise on 1,5 m and more are stated: a) rather sharp increase of a water runoff; b) the excess of the fixed water charge over the runoff norm approximately in 3,5 times and more; c) presence of an ice cover with ice thickness of 0,3 m and more on a significant part of the river. The recommendations to reduce the flooding risk on the Tom river are developed based on the results of ice phenomena modelling.

UDC 550.42:577.4(571.1)

Savichev O.G., Shmakov A.V.
VERTICAL PROFILE AND ANNUAL CHANGES OF CHEMICAL COMPOSITION IN WATERS OF THE TIMIRYAZEVO MEZOTROPHIC MARSH (TOMSK, THE WESTERN SIBERIA)

The complex for sampling marsh waters from different depths is developed and its approbation on the mezotrophic Timiryazevo marsh near Tomsk (Western Siberia) is carried out. The change of marsh waters chemical composition is characterized: in a vertical peat profile – the minimal values of a mineralization in the top part of active horizon; within the hydrological year – maxima during the spring period for microelements, biogenic and organic substances or during the summer period – for main ions.

UDC 622.26

Lukyanov V.G., Pankratov A.V.
INCREASING CAPITAL PRODUCTIVITY OF SELF-POWERED EQUIPMENT AT MULTI-HOLE PENETRATION OF SUBSURFACE LEVEL BRANCHED SYSTEMS

The article shows the economic efficiency of multi-hole operation system controlling self-powered equipment functioning.

UDC 621.644

Povarnitsyn S.V., Rudachenko A.V.
THE LABORATORY BENCH FOR DETERMINING EARTH MOVING OCCURRING AT PIPE DRIVING

The authors generalize the issues of determining earth moving occurring at pipe driving. The article describes the bench construction developed and designed by the authors for studying power characteristics, determining earth moving, the method of pipe jacking in the ground. The recommendations for preparation and further treatment of image by particle image velocimetry are given.

UDC 550.42

Berchuk V.Yu., Rikhvanov L.P., Gotye-Lyafay F.
ACCUMULATION LEVELS AND DISTRIBUTION CHARACTER OF LANTHANIDES AND TRANSURANIUM ELEMENTS IN A VERTICAL SECTION OF FLOODPLAIN SOILS IN CHERNILSCHIKOVO ARM (THE TOM RIVER)

The authors studied floodplain soils of the river Tom (Chernilschikovo arm) within 30 kilometers of the Siberian chemical combine. They defined the concentration levels and the character of vertical distribution of the elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Th, U) determined by instrumental neutron activation analysis as well as specific activity levels for radioactive isotopes ^{241}Am, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{152}Eu, ^{154}Eu determined by alpha spectrometry. Th/U and ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu ratios are examined as pollution indicators. The authors discussed the sources causing element concentration increase in the soils.

UDC 621.039.7

Gorbunova O.A., Vinokurov S.E.
CONDITIONING OF LOW-AND MEDIUM RADIOACTIVE WASTE CONSIDERING CEMENT COMPOUND PROTECTION FROM MICROBIAL CORROSION

It was ascertained for the first time that application of biocide polymer of polyhexamethyleneguanidine type in cementing liquid and solid radioactive waste of low and medium activity allows not only preventing microbial corrosion of cement compounds at long-term storage in near-surface reservoirs but also improving a number of important cementing process variables, raising the end product strength properties, increasing the end compound waste filling rate and extending the range of radioactive waste accepted for cementing.

UDC [621.039+621.311.24:621.039]:614.876(470+571)

Khvostova M.S.
ENGINEERING AND ECOLOGICAL FEATURES OF DECOMMISSIONING THE INDUSTRIAL URANIUM-GRAPHITE NUCLEAR REACTORS AND NUCLEAR RESEARCH FACILITIES

The article covers the issues of expected decommissioning the industrial uranium-graphite nuclear reactors and nuclear research facilities. It is shown that the main issues of radiation safety are connected to treatment with the irradiated graphite stacks, activate metal structures, radioactive waste and spent nuclear fuel.

UDC 502.55

Goryukhin M.V.
THE RESEARCH OF HEAVY METAL INPUT TO ENVIRONMENTAL COMPONENTS BY THE EXAMPLE OF KHINGANSK TIN ORE DEPOSIT IN JEWISH AUTONOMOUS REGION

The author studies the heavy metal outflow from the territory of Khingansk tin deposit developed in the recent past. The results obtained indicate the significant pollution of soils and waters of the river Levy Khingan and its feeders with the heavy metal salts. A set of pollutants in concentration decrease in the media analyzed is introduced in the following way: in water – Ni>Fe>Mn>Cu; in water extracts of soils and cleaning rejects – Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Cu>Co>Sn>Cd; in the extracts with ammonium-acetate buffer solution – Zn>Mn>Fe>Pb>Cu>Cd>Co>Ni. It was determined that the highest increase of heavy metal salt concentration in water is typical for nickel. It is to 8,6 MPC; for iron it is 5,5 and for manganese it is to 4,7; in the soil for zinc it is over 40, for lead it is over 15 and for manganese it is over 10 MPC.

UDC 591.5;552.578.2;547

Kulkov M.G., Korzhov Yu.V., Artamonov V.Yu., Uglev V.V.
STRUCTURE AND FEATURES OF CHANGING IN TIME OF ORGANIC SUBSTANCE WATER-SOLUBLE COMPLEX IN OIL POLLUTED WATER ENVIRONMENT

The authors carried out the laboratory experiment for studying the composition of organic substance water-soluble complex in oil polluted water environment and features of its changing in time at constant and broken contact of water with oil film. A specific set of initial and transformed hydrocarbon and non-hydrocarbon compound-indicators showing the fact of water medium contact with oil was determined.

UDC 378:56(571.16)(092)

Rychkova I.V., Ryabchikova E.D.
MIKHAIL ERASTOVICH JANISHEVSKY – THE FOUNDER OF THE DEPARTMENT OF PALEONTOLOGY AT TOMSK TECHNOLOGICAL INSTITUTE

In 2011 there was the 140th anniversary of M.E. Janishevsky's birth. Mikhail Erastovich Janishevsky is the founder of the department of paleontology at Tomsk technological institute (Tomsk polytechnic university), the outstanding paleontologist; and in 2012 there is the 110th anniversary of this department's foundation.

UDC [548.2+616.6]:378.662(571.16)

Polienko A.K., Sevostyanova O.A.
THE DEVELOPMENT OF THE RESEARCHES IN BIOMINERALOGY AND UROLOGY AT TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

The authors state the history of initiation and development of the researches in biological mineralogy and urology at Tomsk polytechnic institute (university) which were carried out together with the urologists of the Siberian state medical university. The article shows the participation of mineralogists and urologists in researching organic-mineral aggregates (uroliths) formed in the human urinary system. The leading scientists in the field of biological mineralogy as well as the urologists participating in researching uroliths are noted in the article. The perspectives in developing the cooperation of mineralogists and urologists are determined.

Сведения об авторах

Ананьев Юрий Сергеевич, 1966 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-39-61. E-mail: AnanyevYS@ignd.tpu.ru. Область научных интересов: геология и геохимия золоторудных и полиметаллических месторождений Алтае-Саянской области, геоинформационные технологии при геологических исследованиях.

Ананьева Людмила Геннадьевна, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-06-82. E-mail: lga@tpu.ru. Область научных интересов: минералогия.

Анциферова Анастасия Алексеевна, студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-32-56. E-mail: aaants@mail.ru. Область научных интересов: минералогия, геология и разведка полезных ископаемых.

Артамонов Вадим Юрьевич, 1954 г.р., канд. техн. наук, с.н.с. Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва. Р.т. 8-(499)-135-61-21. E-mail: vartamonov@bk.ru. Область научных интересов: физико-химические процессы в технологиях добычи нефти.

Берчук Вадим Юрьевич, 1981 г.р., ассистент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 70-17-77 доп. 2914. E-mail: berchuk@tpu.ru. Область научных интересов: экология, радиоактивные элементы в окружающей среде, уровни их концентраций, характер распределения.

Верхозин Андрей Васильевич, 1957 г.р., заместитель главного геолога ООО «Ленская золоторудная компания», г. Бодайбо. Р.т. 8-(395-61)-7-60-16. E-mail: VerkhozinAV@polyusgold.com. Область научных интересов: геологические и геохимические особенности строения рудных месторождений и методы их поисков и разведки.

Винокуров Сергей Евгеньевич, 1976 г.р., канд. хим. наук, старший научный сотрудник лаборатории радиохимии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва. Р.т. 8(495)-939-70-07. E-mail: vinokurov@geokhi.ru. Область научных интересов: синтез и свойства матричных материалов для иммобилизации радионуклидов.

Власкин Константин Игоревич, 1987 г.р., мл. науч. сотр. кафедры информационно- измерительной техники факультета авиационного приборостроения Уфимского государственного авиационного технического университета. Р.т. 8-(347)-273-06-88. E-mail: ugatu_iit@mail.ru. Область научных интересов: первичные преобразователи физических величин.

Воронцов Александр Александрович, 1966 г.р., д-р геол.-минерал. наук, с.н.с. лаборатории геохимии основного и ультраосновного магматизма Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск. Р.т. 8-(395-2)-42-97-71. E-mail: voron@igc.irk.ru. Область научных интересов: геология, геохимия, магматизм, геодинамика.

Врублевский Василий Васильевич, 1956 г.р., д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры динамической геологии геолого-географического факультета Томского государственного университета. Р.т. 52-94-68. E-mail: labspm@ggf.tsu.ru. Область научных интересов: петрология щелочного и карбонатитового магматизма.

Ву Ван Хай, 1985 г.р., аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 49-19-62. E-mail: vuvanhai19852004@yahoo.com. Область научных интересов: органическая геохимия, выявление закономерностей в составе, строении и распределении отдельных классов хемофоссилий.

Гаврилов Роман Юрьевич, 1978 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-38-05. E-mail: GavrilovRY@ignd.tpu.ru. Область научных интересов: металлогения золота, геохимические особенности поведения рудогенных элементов в пределах рудных полей и месторождений.

Гертнер Игорь Федорович, 1960 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Томского государственного университета. Р.т. 52-94-45. E-mail: labspm@ggf.tsu.ru. Область научных интересов: петрология щелочного и базит-ультрабазитового магматизма

Гладков Евгений Алексеевич, 1974 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разработки нефтяных и газовых месторождений Института природных ресурсов ТПУ; с.н.с. лаборатории № 339 Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Р.т. 42-62-70, 49-13-82. E-mail: gladkov1974@mail.ru. Область научных интересов: геология, геология нефти и газа, разработка и эксплуатация залежей углеводородов, литология, геофизика, 3D-моделирование.

Горбунова Ольга Анатольевна, 1971 г.р., канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории радиохимии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва. Р.т. 8(985)-783-58-66. E-mail: olg-gorbunova@yandex.ru. Область научных интересов: технологии цементирования радиоактивных отходов, свойства цементных компаундов с радиоактивных отходов при длительном хранении.

Горюхин Михаил Владимирович, 1980 г.р. м.н.с. лаборатории региональных геоэкологических исследований Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан. Р.т. 8-(426-22)-6-13-62. E-mail: goruhin@mail.ru. Область научных интересов: изучение экологических последствий разработки полезных ископаемых, ресурсный потенциал отходов добычи и обогащения.

Гудымович Сергей Сергеевич, 1933 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-13-13. E-mail: gudss@tpu.ru. Область научных интересов: геоморфология и четвертичная геология, неотектоника, геология россыпных месторождений золота.

Гуленок Регина Юрьевна, гл. научный сотрудник ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», г. Южно-Сахалинск. Р.т. 8-(424-2)-49-87-18. E-mail: gulenok_r@mail.ru. Область научных интересов: нефтегеологическая интер-

претация геолого-геофизических данных, геоинформационные технологии.

Ежова Александра Викторовна, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-60. E-mail: eav@tpu.ru. Область научных интересов: нефтегазовая литология, изучение коллекторов нефти и газа, геологическая интерпретация геофизических данных.

Ерофеев Леонид Яковлевич, 1935 г.р., д-р геол.-минерал. наук, зав. кафедрой геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-72. E-mail: geof@tpu.ru. Область научных интересов: петрофизика, методики геофизических разведок.

Ерофеева Галина Васильевна, канд. техн. наук, д-р пед. наук, профессор кафедры общей физики Физико-технического института ТПУ. Р.т. 56-34-03. E-mail: egv@tpu.ru. Область научных интересов: информационные технологии в образовательной деятельности и технических системах.

Житков Владимир Георгиевич, 1958 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-39-61. E-mail: vlgitkov@yandex.ru. Область научных интересов: региональная геология прогнозирование, поиски месторождений, геоинформационные технологии при геологических исследованиях.

Захарова Алёна Александровна, д-р техн. наук, зав. лабораторией 3D-моделирования Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-06-98. E-mail: zaa@tpu.ru. Область научных интересов: моделирование нефтегазовых месторождений.

Ильенок Сергей Сергеевич, 1986 г.р., ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-89-10. E-mail: ilenokss@rambler.ru. Область научных интересов: геохимия и минералогия угля, электронная микроскопия.

Ильин Станислав Сергеевич, 1981 г.р., ведущий инженер горно-геологического отдела ООО «Полюс Проект», аспирант кафедры геологии месторождений и методики разведки ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. Р.т. 8-(391)-290-67-34. E-mail: IlyinStanislav@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование месторождений, геохимическая зональность рудных месторождений.

Исаев Валерий Иванович, 1952 г.р., д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-65. E-mail: isaev_sah@mail.ru. Область научных интересов: нефтегеологическая интерпретация геолого-геофизических данных, гравиметрия.

Ковешников Александр Евгеньевич, 1953 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-63-81. E-mail: sanika@tpu.ru. Область научных интересов: геология нефти и газа, литология и коллекторские свойства пород-коллекторов доюрских отложений Западной Сибири.

Колмаков Юрий Викторович, 1966 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-65. E-mail: kolmakovyv@tpu.ru. Область научных интересов: магматизм, петрофизика, рудогенез, физико-геологическое моделирование месторождений золота.

Коржов Юрий Владимирович, 1962 г.р., канд. хим. наук, доцент кафедры геологии Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск. Р.т. 8-(346-7)-35-76-65. E-mail: ykor1962@mail.ru. Область научных интересов: органическая геохимия нефтегазоносных регионов.

Коробейников Александр Феопенович, 1934 г.р., д-р геол.-минерал. наук, профессор, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 55-58-36. E-mail: paya@tpu.ru. Область научных интересов: геология и геохимия благородных металлов, прогнозирование и поиски.

Коровкин Михаил Владимирович, 1952 г.р., д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-32-56. E-mail: mvk@tpu.ru. Область научных интересов: физика минералов, радиационная физика диэлектриков, физические методы исследования минералов.

Красноярова Наталья Алексеевна, канд. геол.-минерал. наук, н.с. лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-19-62. E-mail: natalex@ipc.tsc.ru. Область научных интересов: органическая геохимия и нефтехимия, выявление закономерностей в составе, строении и распределении в нефтях углеводородов и кислородсодержащих соединений.

Крохалев Игорь Витальевич, 1971 г.р., заместитель главного геолога ОАО «Таймыргаз», г. Норильск. Р.т. 8-(391-9)-22-36-98. E-mail: sever71@gmail.com. Область научных интересов: апробация новых методов определения подсчетных параметров газовых и газоконденсатных пластов и составление регламентов для их практического применения при подсчете запасов на месторождениях.

Кульков Михаил Григорьевич, 1983 г.р., ведущий инженер кафедры геологии Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск. Р.т. 8-(346-7)-35-76-65. E-mail: mgk83@bk.ru. Область научных интересов: изучение нефтяных загрязнений природных сред.

Кучеренко Игорь Васильевич, 1937 г.р., д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-38-05. E-mail: Kucherenko.o@sibmail.com. Область научных интересов: геохимия и металлогения золота.

Лобова Галина Анатольевна, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-64. E-mail: lobovaga@tpu.ru. Область научных интересов: нефтегеологическая интерпретация геолого-геофизических данных.

Лукин Алексей Анатольевич, 1986 г.р., ассистент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-64. E-mail: Lukin@tpu.ru. Область научных интересов: волновые процессы в гидрогеодинамическом напорном поле, проблема анизотропности фильтрационных свойств, промысловая геофизика.

Лукьянов Виктор Григорьевич, 1930 г.р., д-р техн. наук, Заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедр транспорта и хранения нефти и газа и геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-88-26. E-mail: lev@tpu.ru. Область научных интересов: разработка научных основ и внедрение комплексов прогрессивных методов, технических средств и технологий горных работ для поиска и разведки месторождений золота.

Макаров Владимир Александрович, 1958 г.р., д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геологии месторождений и методики разведки, директор Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск. Р.т. 8-(391)-206-36-93.

E-mail: VMakarov@sfu-kras.ru. Область научных интересов: прогнозно-металлогенические работы; геология и условия формирования месторождений цветных и благородных металлов.

Мартыненко Владимир Геннадьевич, 1948 г.р., главный геолог ООО «Ленская золоторудная компания», г. Бодайбо. Р.т. 8-(395-61)-7-60-16. E-mail: MartynenkoVG@polyusgold.com. Область научных интересов: анализ рудоносных обстановок, определяющих локализацию месторождений.

Недоливко Наталья Михайловна, канд. геол.-минерал. наук., доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-63-81. E-mail: nedolivkonm@yandex.ru. Область научных интересов: седиментология и вторичные преобразования природных резервуаров.

Панкратов Алексей Валентинович, 1953 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-88-26. E-mail: lev@tpu.ru. Область научных интересов: повышение фондоотдачи самоходного оборудования при многозабойной проходке разветвленных систем подземных горизонтальных выработок.

Паровинчак Константин Михайлович, 1977 г.р., руководитель проекта департамента разработки месторождений ОАО «НК Роснефть», г. Москва. Р.т. 8-(495)-777-44-77. E-mail: kparovinchak@rosneft.ru. Область научных интересов: разработка и апробация методов оценки качества моделирования геологического строения продуктивных пластов на нефтяных месторождениях.

Пешков Викторин Евгеньевич, 1940 г.р., канд. геол.-минерал. наук, в.н.с. отдела сопровождения разработки нефтяных и газовых месторождений Томский филиал ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья». Р.т. 24-15-19. E-mail: pochta@tf-sniiggims.ru. Область научных интересов: гидродинамические исследования пластов, методы разработки нефтяных и газовых месторождений и анализ их эффективности.

Пешков Игорь Викторинович, 1968 г.р., геолог ООО СК «Шлюмберже», г. Тюмень. Р.т. 42-32-44. E-mail: ipeshkov@mail.ru. Область научных интересов: моделирование геологического строения пластов на месторождениях нефти и газа, по результатам гидродинамических и геофизических исследований скважин.

Поварницын Сергей Викторович, 1980 г.р., зав. лабораторией кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-90-17. E-mail: povarnit@tpu.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, экспериментальные исследования, разработка способов и устройств бестраншейной прокладки трубопроводов.

Полиенко Александр Константинович, 1940 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-13-13. E-mail: polienkoa@yandex.ru. Область научных интересов: минералогия, кристаллография, биологическая минералогия, геоэкология.

Поцелуев Анатолий Алексеевич, 1952 г.р., д-р геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-36-05, 56-39-61. E-mail: PoceluevAA@ignd.tpu.ru. Область научных интересов: минерагения месторождений редких, благородных и цветных металлов, дистанционные методы исследований.

Прищепов Сергей Константинович, 1956 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники факультета авиационного приборостроения Уфимского государственного авиационного технического университета. Р.т. 8-(347)-273-06-88. E-mail: prischep@ufanet.ru. Область научных интересов: первичные преобразователи физических величин.

Пятаков Юрий Владиславович, 1955 г.р., канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем Воронежского государственного университета инженерных технологий. Р.т. 8-(473-2)-55-38-75. E-mail: pyatakovjv@mail.ru. Область научных интересов: математическая геофизика, информатика.

Рихванов Леонид Петрович, 1945 г.р. д-р геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-89-10. E-mail: rikhvanov@tpu.ru. Область научных интересов: геохимия редких и радиоактивных элементов в природных средах.

Рудаченко Александр Валентинович, 1949 г.р., канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-53. E-mail: ktxng@tpu.ru. Область научных интересов: проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ, математическое моделирование, экспериментальные исследования, разработка способов и устройств бестраншейной прокладки трубопроводов.

Рычкова Ирина Владимировна, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-46-28. E-mail: irina.rychkova@mail.ru. Область научных интересов: палеонтология, стратиграфия юго-востока Западной Сибири и Колывань-Томской складчатой зоны.

Рябчикова Элла Давыдовна, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-46-28. E-mail: ryabchikova@tpu.ru. Область научных интересов: палеонтология, стратиграфия кайнозоя Кузбасса, юго-востока Западной Сибири, Колывань-Томской складчатой зоны, лессовидные суглинки, погребенные почвы.

Савиных Юрий Валентинович, д-р хим. наук, с.н.с. Института химии нефти СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-19-27. E-mail: yu-sav2007@yandex.ru. Область научных интересов: органическая геохимия и нефтехимия, выявление закономерностей в составе, строении и распределении отдельных классов хемофоссилий.

Савичев Олег Геннадьевич, 1967 г.р., д-р географ. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии, начальник научного отдела Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-56. E-mail: OSavichev@mail.ru. Область научных интересов: гидрология, гидрохимия, геоэкология.

Сазонов Анатолий Максимович, 1943 г.р., д-р геол.-минерал. наук, зав. кафедрой геологии, минералогии и петрографии Сибирского федерального университета, г. Красноярск. Р.т. 8-(391-2)-34-51-28. E-mail: sazonov_am@mail.ru. Область научных интересов: петрография рудных полей, минералогия и геохимия благородных металлов.

Севостьянова Ольга Александровна, 1970 г.р., ассистент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-32-28. E-mail: sevostianovaoa@tpu.ru. Область научных интересов: минералогия, биологическая минералогия, геоэкология.

Серебренникова Ольга Викторовна, д-р хим. наук, профессор кафедры геологии и разработки нефтяных месторожде-

ний Института природных ресурсов ТПУ, зав. лабораторией Института химии нефти СО РАН. Р.т. 49-19-27. E-mail: ovs@ipc.tsc.ru. Область научных интересов: органическая геохимия и нефтехимия, выявление закономерностей в составе, строении и распределении отдельных классов хемофоссилий.

Синицин Евгений Александрович, 1980 г.р., гл. специалист ООО «Геологическая сервисная компания», г. Томск, Р.т. 53-47-16. E-mail: sinitsynea@gskoil.ru**.** Область научных интересов: разработка и апробация методов оценки качества вскрытия нефтяных и газовых пластов на месторождениях Западной Сибири.

Тимкин Тимофей Васильевич, 1983 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-45-13. E-mail: timkintv@mail.ru. Область научных интересов: геология, геохимия золоторудных месторождений.

Тишин Платон Алексеевич, 1972 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Томского государственного университета. Р.т. 52-94-45. E-mail: labspm@ggf.tsu.ru. Область научных интересов: магматическая и метаморфическая петрология, структурная геология и генезис золоторудных месторождений.

Углев Владимир Владимирович, 1955 г.р., канд. хим. наук, доцент кафедры экологии Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск. Р.т. 8-(346-7)-35-76-67. E-mail: v_uglev@ugrasu.ru. Область научных интересов: мониторинг техногенно нарушенных территорий.

Устинова Вера Николаевна, д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-72. E-mail: ustinovavn@tpu.ru. Область научных интересов: обработка и интерпретация материалов сейсморазведки, математические методы моделирования геофизических полей и геолого-геофизических объектов, фильтрация полей.

Устинова Ирина Георгиевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики Физико-технического института ТПУ. Р.т. 56-35-93. E-mail: hggh45de@mail2000.ru. Область научных интересов: математические методы моделирования процессов и явлений, фильтрация геофизических полей.

Федосеев Гелий Сергеевич, 1935 г.р., канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры минералогии и петрографии Новосибирского государственного университета, с.н.с. лаборатории рудно-магматических систем и металлогении Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск. Р.т. 8-(383-3)-330-45-03. E-mail: fedoseev@igm.nsc.ru. Область научных интересов: общая петрография, магматическая петрология, полевая геология, металлогения магматических комплексов.

Франциа Готье-Ляфай (François Gauthier-Lafaye), 1949 г.р., д-р филос., директор по исследованиям Национального центра научных исследований (CNRS), лаборатория гидрологии и геохимии, Страсбургский университет, Франция. Р.т. 8-(10-33-390)-03-68-85-04-23. E-mail: fgl@unistra.fr. Область научных интересов: геохимия редких и радиоактивных элементов в природных средах.

Хвостова Марина Сергеевна, 1978 г.р., канд. геогр. наук, доцент кафедры океанотехники и энергетических установок Филиала Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (Севмашвтуз), г. Северодвинск. Р.т. 8-(818-42)-58-45-82. E-mail: marinakhvostova@list.ru. Область научных интересов: радиационная и экологическая безопасность объектов использования атомной энергии.

Хромовских Андрей Юрьевич, 1985 г.р., м.н.с. отдела моделирования ОАО «ТомскНИПИнефть», аспирант кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 61-18-63. E-mail: KhromovskikhAY@nipineft.tomsk.ru. Область научных интересов: литология, седиментология, петрофизика, геологическое моделирование месторождений, подсчет запасов углеводородов, аудит запасов.

Чернышев Алексей Иванович, 1953 г.р., д-р геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой петрографии геолого-географического факультета Томского государственного университета. Р.т. 52-94-45. E-mail: aich@ggf.tsu.ru. Область научных интересов: петрология ультрамафитовых, мафит-ультрамафитовых комплексов и их металлогения.

Шмаков Андрей Валентинович, 1964 г.р., ассистент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-67. E-mail: ashmakov@mail.ru. Область научных интересов: гидрология, гидрохимия, геоэкология.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи до 8 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1.** Название; **Таблица.** Название. Кавычки вида «…». Интервалы – 1,2…1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ($U_{\text{пр.}}$, Φ_i, но Al_2O_3, $\cos\alpha_i$, max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5-2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7].

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ

И.И. Иванов, П.П. Петров*

Томский политехнический университет
*ОАО «Центр», г. Москва
E-mail: ivanov@tpu.ru

Показана возможность расчета … Установлено, что … Сделан вывод о том, что … (Аннотация, 10 кегль).

Ключевые слова (ниже ключевые слова на английском языке):
Усилительный каскад, регулировка тока.

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2012. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2012. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2012. – Т. 316. – № 4. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.10; опубл. 10.10.12, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2012. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2012. URL: http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm (дата обращения: 25.09.2012).

Поступила 25.04.2012 г.

Сведения об авторах:
Иванов Иван Иванович, 1975 г.р., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 22-22-22. E-mail: ivanov@tpu.ru. Область научных интересов: анализ…

Редактирование и корректура *М.А. Шустов*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык *С.В. Жаркова*

Подписано к печати 24.01.2012. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,3. Уч.-изд. л. 23,8.
Заказ 53-12. Тираж 500 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, shustov@tpu.ru